

Titre: Désagrégation des débits mensuels en débits journaliers
Title:

Auteur: Tanou Ya Kouassi Ypou
Author:

Date: 2015

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Ypou, T. Y. K. (2015). Désagrégation des débits mensuels en débits journaliers
Citation: [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
<https://publications.polymtl.ca/2018/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/2018/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Musandji Fuamba
Advisors:

Programme: Génie civil
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

DÉSAGRÉGATION DES DÉBITS MENSUELS EN DÉBITS JOURNALIERS

TANOU YA KOUASSI YPOU

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

(GÉNIE CIVIL)

DÉCEMBRE 2015

© Tanou Ya Kouassi Ypou, 2015.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

DÉSAGRÉGATION DES DÉBITS MENSUELS EN DÉBITS JOURNALIERS

présenté par : YPOU Tanou Ya Kouassi

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. LI Li, Doctorat, président

M. FUAMBA Musandji, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. KAHAWITA René Ph. D., membre

DÉDICACE

Je dédie ce travail à

Mes chers parents pour leur affection et leur support

À mon épouse

À mes enfants Paul, Éden et Yohann.

REMERCIEMENTS

J'adresse ma gratitude à mes encadreurs, Professeur Musandji Fuamba et Dr. Leslie Dolcine, pour le soutien et l'encadrement fournis pendant la réalisation de ce travail.

Je remercie respectivement Dr. Mathurin Daynou et Dr. Konan Da avec qui j'ai travaillé respectivement sur la calibration des modèles et l'utilisation du modèle HYDROTEL, M Mballa Landry pour ses conseils.

Mes remerciements vont également à l'endroit d'Hydro-Québec pour m'avoir permis de travailler dans le projet de restitution des apports naturels réels (ANR) dans les réservoirs.

Merci aux professeurs Li Li et René Kahawita pour avoir accepté d'être respectivement président et membre de mon comité.

Je parachève ce chapitre tout en adressant mes remerciements à toute personne qui de près ou de loin a contribué à la réalisation de cet ouvrage.

RÉSUMÉ

Une estimation adéquate des apports naturels historiques générés dans un système hydrique (SH) permet une bonne gestion des réservoirs de centrales hydroélectriques. Cette gestion est une garantie pour une planification efficiente de la production d'hydroélectricité. La reconstruction des apports naturels réels (ANR) de qualité, pour les périodes avant et après la mise en eau des réservoirs, est recherchée par Hydro-Québec (HQ). La mise en place des séries de données historiques journalières à partir des séries de données mensuelles demeure une préoccupation majeure tant pour HQ que pour la communauté scientifique.

Au-delà des avantages liés à la maîtrise du comportement hydrologique des bassins des systèmes hydriques, la présente étude vise aussi la mise en place des mesures appropriées en vue de protéger les populations et les divers biens situés dans les zones concernées.

L'objectif principal de cette recherche est la désagrégation des débits mensuels en débits journaliers. La présente recherche se situe dans le contexte opérationnel d'HQ. En effet, afin de reconstituer les ANR journaliers historiques des SH d'HQ, l'utilisation des modèles HSAMI et HYDROTEL pour la désagrégation des ANR mensuels en ANR journaliers est analysée.

Différentes méthodes ont été utilisées par HQ pour reconstituer des séries des ANR historiques journaliers. A ce jour, l'analyse de la qualité des séries des ANR reconstituées illustre la présence d'importantes incohérences et des erreurs dans lesdites séries. Différentes études antérieures présentées dans la littérature scientifique ont proposé des méthodes pour reconstruire les séries de débits journaliers historiques à partir de séries de débits mensuelles. Mais ces différentes approches ont fourni des résultats qui ne représentent pas la réalité hydrologique des SH d'HQ. En clair les méthodes ne sont pas efficaces sur les bassins versants (BV) non jaugés d'HQ.

La présente étude propose une approche basée sur l'utilisation optimisée des modèles HSAMI et HYDROTEL dans le but de transformer les précipitations solides et liquides en débit pour la reconstruction des séries d'apports naturels, en relation avec les données et les conditions hydrologiques des bassins versants. La démarche est appliquée aux SH des Outardes et de Saint-Maurice pour lesquels des données météorologiques et physiques de terrain sont disponibles.

Les séries de données d'entrée (hydrologiques et météorologiques) sont respectivement validées. Une démarche d'analyse de la qualité des données, des débits spécifiques et des paramètres

d'évaporation a été appliquée pour les séries hydrologiques. Pour les séries météorologiques, une analyse des critères statistique, climatologique et hydrologique a été effectuée.

La calibration automatique des deux modèles est réalisée en utilisant des programmes conçus avec le logiciel Matlab. Les résultats de la calibration des modèles hydrologiques HYDROTEL et HSAMI sur les BV des SH des Outardes et de Saint-Maurice sont présentés dans le rapport.

La modélisation des conditions de terrain est faite pour les besoins de données d'entrée des différents modèles. Des fonctionnalités incluses dans les modèles présentés de ce mémoire en général et en particulier pour le modèle Physitel complémentaire à HYDROTEL prennent en compte les conditions de terrain. La simulation des débits historiques est réalisée en utilisant les données météorologiques et les données physiques de terrain sur les périodes de 1965 à 2014.

Sur la base de la qualité des données d'entrée disponibles et l'objectif de générer des séries des ANR historiques journalières en utilisant des ANR historiques mensuelles, les critères de qualité ont été définis afin de qualifier le modèle à choisir. En effet, Les critères utilisés pour la calibration des deux modèles sont le critère de Nash-Sutcliffe NSE et le critère Kling-Gupta (KGE, Kling-Gupta Efficiency). L'aspect du coût d'opération est considéré dans cette étude.

L'analyse des résultats obtenus a permis de conclure que le modèle HYDROTEL est le plus approprié dans le cadre opérationnel d'HQ pour désagréger les séries historiques mensuelles des débits disponibles en séries de débits journaliers.

Le modèle HYDROTEL permet de désagréger des débits mensuels en débits journaliers et de reconstituer les bases de données historiques d'HQ. Les débits journaliers simulés du BV Beaumont sont présentés et analysés dans cette étude qui recommande à HQ d'utiliser le modèle HYDROTEL pour reconstituer ses bases de données journalières à partir de données mensuelles disponibles.

Mots clés : désagrégation, apports naturels, HYDROTEL, HSAMI, reconstitution de donnés.

ABSTRACT

A good estimate of the historical natural flow of water in a water system, allows an appropriate management of reservoirs of hydroelectric plants. This management is a guarantee for efficient planning of hydropower production. The reconstruction of the real natural inputs with quality features for the periods before and after the impoundment of reservoirs is sought by HQ. The implementation of a good quality daily historical data from monthly data remains a major concern both for HQ and for the scientific community.

Beyond the benefits of mastering simulations of the basin's hydrological behavior in water systems, this study allows the establishment of appropriate measures to protect the population and the various properties located in riparian areas of water systems.

The main objective of the study is the breakdown of monthly flows in daily flows. This study is in the business context of HQ.

To reconstruct the historical supply of water systems, HSAMI and HYDROTEL models are used. Different methods have been used by HQ to constitute the daily historical rates. So far, a good quality of the reconstituted daily data analysis illustrates the serious discrepancies and errors in those series. Several previous studies in the literature have attempted to reconstruct the daily flow rates from historical monthly series, but as explained in the report, these different approaches have results that do not represent the reality of HQ's water systems. Clearly the methods are not effective in the operational framework of Hydro -Québec

This report presents an optimized use based on the approach HSAMI and HYDROTEL models in order to transform the flow of rain for the reconstruction of natural flow series. This approach is applied to Outardes's and Saint-Maurice's water systems with the weather and physical field data available.

Input the hydrological data are validated by a process of analyzing data quality, specific flow and evaporation parameters.

Input the metrological data has been analysis by Statistics, climate and water for weather series criteria.

An automatic calibration of the two models is made with the Matlab software. The results of the calibration of Outardes's and Saint-Maurice's water systems are presented in this report.

The modeling of ground conditions is made for input data needs of different models using the features included in the models are generally presented in this report and in particular the model for HYDROTEL and PHYSITEL. The historical simulation flows is performed using meteorological data and physical field data on the periods of 1965 to 2014.

Based on the quality of input data available and the goal of generating daily historical supply series using monthly series of natural inputs, the quality criteria have been defined to qualify the model to choose. Indeed, the quality criteria for comparing the two models are the criterion of NSE and KGE.

Analysis of the results led to the conclusion that the HYDROTEL model is most appropriate in the operational framework of HQ to disaggregate monthly historical series of daily flows in series.

The HYDROTEL model enabled to disaggregate monthly debits daily flows. The daily discharges simulated ponds Beaumont, Vermillion, La tuque are presented and analyzed in this report.

Keywords: disaggregation, natural flow, HYDROTEL, HSAMI, data reconstruction

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XIII
LISTE DES FIGURES.....	XIV
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XVI
LISTE DES ANNEXES.....	XVII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Problématique.....	2
1.2 Objectifs	3
1.3 Plan et contenu du mémoire	3
1.4 Méthodologie	4
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	6
2.1 Reconstitution des apports naturels.....	6
2.2 Désagrégation des apports naturels	7
2.3 Méthode stochastique.....	8
2.3.1 Méthode déterministe de désagrégation.....	11
2.3.2 Méthode hybride	13
CHAPITRE 3 MODÈLES HYDROLOGIQUES UTILISÉS	15
3.1 Le modèle semi distribué: HYDROTEL.....	15
3.1.1 Le modèle HYDROTEL	15

3.1.2	Le modèle PHISITEL.....	16
3.1.3	Le modèle global: HSAMI.....	18
3.1.4	Synthèse des modèles HSAMI et HYDROTEL	19
CHAPITRE 4 DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE		20
4.1	Système hydrique des Outardes	21
4.2	Système hydrique de Saint-Maurice	22
CHAPITRE 5 INVENTAIRE ET VALIDATION DES DONNÉES D'ENTRÉE.....		23
5.1	Inventaire des données d'entrée.....	23
5.1.1	Les séries hydrométriques	23
5.1.2	Les séries météorologiques	23
5.2	Processus de validation des données d'entrée	24
5.2.1	Les séries hydrométriques.....	25
5.2.2	Les séries météorologiques	26
5.3	Résultats de la validation des données d'entrée	27
5.3.1	Les séries hydrométriques.....	27
5.3.2	Définition des classes de qualité	27
5.3.3	Les séries météorologiques	38
CHAPITRE 6 VALIDATION ET CALIBRATION DES MODÈLES.....		40
6.1	La problématique de la calibration des modèles hydrologiques	40
6.2	La détermination des fonctions objectives et de l'optimiseur	40
6.3	Résultat de la calibration	42
6.3.1	Calibration du modèle HSAMI	42
6.4	Calibration du modèle HYDROTEL.....	45
6.5	Résultat et discussion de la calibration	47

CHAPITRE 7	CHOIX DE LA MÉTHODE ADÉQUATE	48
7.1	Détermination des indicateurs de choix	48
7.1.1	Aspect Technique	48
7.1.2	Aspect coûts d'opération	49
7.2	Étude comparative des deux modèles	50
7.2.1	Méthodologie utilisée	50
7.2.2	Définition des critères	51
7.2.3	Définition des alternatives	51
7.2.4	Estimation numérique de l'échelle verbale	52
7.3	Résultats	52
7.3.1	Estimation des différents poids	52
CHAPITRE 8	PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	55
8.1	Les données entrée et la modélisation	55
8.1.1	Les données d'entrée du BV Beaumont	55
8.1.2	La modélisation du BV Beaumont	55
8.2	Résultats de la modélisation hydrologique	56
8.3	Résultats du modèle terrain	56
8.4	Résultats de la simulation	61
8.5	Analyse des débits simulés du bassin Beaumont.	62
8.5.1	Variation Journalière	62
8.5.2	Variation mensuelle	64
8.6	Variation saisonnière	66
8.7	Variation annuelle	68
8.8	Analyse des volumes	69

CHAPITRE 9	SYNTHÈSE ET DISCUSSION	71
9.1	Discussion	71
9.2	Critique.....	72
9.3	Portée des résultats	73
9.4	Perspectives	74
9.5	Conclusion.....	74
CHAPITRE 10	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	75
BIBLIOGRAPHIE	77
ANNEXES	83

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 : Présentation succincte des deux modèles hydrologiques	19
Tableau 4.1 : Synthèse des bassins et des stations hydrométriques	20
Tableau 5.1: Définition des Classes de qualité	27
Tableau 5.2: Synthèse de qualité des données d'entrée du SH des Outardes	28
Tableau 5.3: Synthèse des taux d'évaporation _SH des Outardes	31
Tableau 5.4: Synthèse des précipitations, apports et évaporation _SH des Outardes	31
Tableau 5.5: Synthèse de qualité des données d'entrée du SH de Saint-Maurice	32
Tableau 5.6: Synthèse des taux d'évaporation _SH de Saint-Maurice	37
Tableau 5.7: Synthèse des précipitations, apports et évaporation_ SH de Saint-Maurice	37
Tableau 5.8: Rivières Choies avec leur superficie	38
Tableau 6.1: Synthèse des valeurs NSE et KGE _ Calibration HSAMI_ SH de Saint-Maurice ...	42
Tableau 6.2: Synthèse des valeurs NSE_ Calibration HYDROTEL	45
Tableau 6.3: Synthèse des NSE HYDROTEL versus NSE HSAMI	47
Tableau 7.1: Estimation numérique de l'échelle verbale.....	52
Tableau 7.2: Comparaison binaire des critères	53
Tableau 7.3: Évaluation globale.....	54
Tableau 9.1: Valeurs de NSE des BV du SH Saint-Maurice	71

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Schéma de trois réservoirs en série (Hosseinpour et al., 2014)	1
Figure 3.1: Étapes de modélisation d'un bassin avec PHYSITEL (Fortin et al., 2004).	17
Figure 4.1: Système hydrique des Outardes (source: Hydro-Québec).....	21
Figure 4.2: Système hydrique de Saint-Maurice (source: Hydro-Québec)	22
Figure 5.1: Variabilité des débits spécifiques – BV Outarde 02_SH des Outardes	30
Figure 5.2: Variabilité des débits spécifiques – BV Outarde 03_SH des Outardes	30
Figure 5.3: Variabilité des débits spécifiques – BV Outarde 04_SH des Outardes	30
Figure 5.4: Variabilité des débits spécifiques _BV Grand-Mère_ SH de Saint-Maurice	35
Figure 5.5: Variabilité des débits spécifiques _BV Manouane A-B-C_ SH de Saint-Maurice	35
Figure 5.6: Variabilité des débits spécifiques _BV Beaumont_ SH de Saint-Maurice.....	35
Figure 5.7: Variabilité des débits spécifiques _ BV Rapide-blanc_ SH de Saint-Maurice.....	36
Figure 5.8: Variabilité des débits spécifiques _BV La tuque_ SH de Saint-Maurice.....	36
Figure 5.9: Variabilité des débits spécifiques _BV Gouin_ SH de Saint-Maurice	36
Figure 6.1: Calibration HSAMI _ Critère NSE_ BV Beaumont _SH de Saint-Maurice	43
Figure 6.2: Calibration HSAMI_ Critère NSE_ BV Beaumont _SH de Saint-Maurice	44
Figure 6.3: Calibration HYDROTEL du BV Beaumont (SH de Saint-Maurice)	46
Figure 8.1: Variabilité des données d'entrée du BV Beaumont et Vermillon	56
Figure 8.2: Modélisation d'altitude moyenne par UHRH des BV Beaumont et Vermillon.....	57
Figure 8.3: Modélisation de pente moyenne par UHRH des BV Beaumont et Vermillon	58
Figure 8.4: Modélisation de type de sol par UHRH des BV Beaumont et Vermillon	59
Figure 8.5: Modélisation de l'occupation du sol par UHRH des BV Beaumont et Vermillon	60
Figure 8.6: Synthèse du comportement hydrologique des BV Beaumont et Vermillon.....	61
Figure 8.7: Débits journaliers simulés des BV Beaumont et Vermillon	61

Figure 8.8: Cycles journaliers des débits _ BV Beaumont _Période 1985-1995	63
Figure 8.9: Cycles journaliers des débits _ BV Beaumont _Période 1995-2005	63
Figure 8.10: Cycles journaliers des débits _ BV Beaumont _Période 2005-2013.....	63
Figure 8.11: Cycles mensuels des débits _ BV Beaumont _Période 1985-2013	64
Figure 8.12: Cycles journaliers des débits _ BV Beaumont _Période 1985-1995	65
Figure 8.13: Cycles journaliers des débits _ BV Beaumont _Période 1995-2005	65
Figure 8.14: Cycles journaliers des débits _ BV Beaumont _ Période 2005-2015	66
Figure 8.15: Cycles saisonniers des débits _ BV Beaumont _Période 1985-1995	67
Figure 8.16: Cycles saisonniers des débits _ BV Beaumont _Période 1995-2005	67
Figure 8.17: Cycles saisonniers des débits _ BV Beaumont _Période 2005-2013	68
Figure 8.18: Cycles annuels des débits _ BV Beaumont _Période 1985-2013.....	69
Figure 8.19: Variation des volumes d'eau cumulés _ BV Beaumont _ Période 1985-2013.....	70

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AHP	Processus d'analyse hiérarchique (Analytic Hierarchy Process)
ANR	Apport naturel réel
BV	Bassin Versant
BCSA	Bias-Correction and Stochastic Analog method (method)
BCSD	Bias-correction and spatial disaggregation (method)
ETCCDMI	Équipe d'experts pour la surveillance des indices de détection des changements climatiques (Expert Team for Climate Change Detection Monitoring and Indices)
HQ	Hydro-Québec
HSAMI	Hydrological System AMI
HYMAS	(HYdrological Modelling Application System)
IREQ	Institut de recherche en électricité du Québec
MDDELCC	Ministère du développement durable, Environnement et Lutte contre les changements Climatiques.
MNA	Modèle Numérique d'Altitudes
NLWIS	National Land and Water Information Service
OURANOS	Consortium de recherche sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques
SCE-UA	Shuffled Complex Evolution University of Arizona
SH	Système hydrique
SIG	Système d'information géographique
VTI	Variable Time Interval (model)
UHRH	Unité hydrologique relativement homogène
UTM	Universal Transverse Mercator (Transverse Universelle de Mercator)

LISTE DES ANNEXES

Annexe A - Processus simulés et algorithmes utilisés pour les simulations hydrologiques	83
Annexe B - Schéma du modèle conceptuel HSAMi	85
Annexe C - Description des 23 paramètres du modèle HSAMI	87
Annexe D - Schéma du SH de Saint-Maurice	89
Annexe E - Principaux indices climatiques (ETCCDMI)	91
Annexe F - Rapport d'analyse des données hydrometriques _SH des Outardes	93
Annexe G – Rapport d'analyse des données hydrometriques _SH des Outardes	95
Annexe H - Resultats de la calibration du modele HYDROTEL	97
Annexe I - Resultats de la calibration du modele HSAMI.....	99
Annexe J - Resultat de l'application de la methode AHP	116
Annexe K - Resultat des simulations avec le modle HYDROTEL.....	122

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

La détermination des débits journaliers générés sur les différents bassins versants (BV) est un sujet qui demeure toujours en cours de discussion. À ce jour, plusieurs méthodes sont explorées et surtout utilisées pour améliorer l'estimation des Apports Naturels Réels (ANR). Ce sont entre autres: le filtrage des données et l'estimation des séries manquantes (Bennis, Berrada et Kang, 1997), l'estimation des ANR selon le bilan hydrique avec Hosseinpour, Dolcine et Fuamba (2014), la méthode de niveau virtuel dans les réservoirs (Roy, Gauthier et Hétu, 1992) et la reconstitution manuelle des résultats basée sur le bilan hydrique. À l'analyse de ces approches, des questions demeurent sans réponses pour reconstituer les ANR journaliers à partir des séries mensuelles mesurées.

L'ANR dans un réservoir ou à un exutoire de BV est le débit net provenant d'un événement de précipitation (pluie et fonte de neige) sur le BV. La Figure 1.1 présente de façon schématique les ANR selon l'Équation 1.1 du bilan hydrique. Le ruissellement provenant de la pluie ou de la fonte des précipitations solides (neige) est l'ANR recherché dans cette étude.

Équation 1.1

$$ANR = Q_s - Q_e + \left(\frac{\Delta s}{\Delta t}\right)$$

Les composantes Q_s et Q_e représentent respectivement les débits totaux de sortie et d'entrée dans le réservoir R_n . La composante Δs désigne la variation du volume d'eau dans le réservoir R_n pendant une durée Δt .

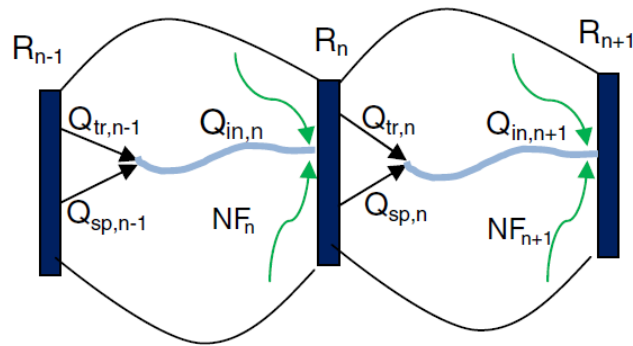


Figure 1.1: Schéma de trois réservoirs en série (Hosseinpour et al., 2014)

La composante $Q_{in,n}$ représente le débit entrant dans le réservoir R_n qui provient des débits $Q_{sp,n-1}$ (déversoir) et $Q_{tr,n-1}$ (turbine) du réservoir R_{n-1} . La composante $Q_{in,n+1}$ représente le débit sortant du réservoir R_n composé des débits $Q_{sp,n}$ et $Q_{tr,n}$ qui alimente le réservoir R_{n+1} .

Les approches développées dans les modèles HSAMI par Bisson (1995) et Nicol (2010) et HYDROTEL (Fortin, Duchesne, Bernier, Huang et Villeneuve, 2007) sont parmi les approches explorées par HQ pour l'estimation des ANR. HSAMI est un modèle global qui permet la reproduction des processus hydrologiques sur un BV quelconque en utilisant le bilan hydrique.

Hydro-Québec (HQ) est à la recherche de méthodes automatiques et fiables pour l'estimation des ANR journaliers dans les différents réservoirs de ses systèmes hydriques aménagés. À partir des séries des ANR mensuels disponibles, un modèle numérique permettant le calcul des ANR journaliers de bonne qualité, permettra de reconstituer les séries d'ANR journaliers historiques.

Le présent projet a donc pour objectif de répondre au besoin d'HQ en comparant les deux approches de solution basées sur l'utilisation des modèles hydrologiques HSAMI et HYDROTEL. Suite à cette étude, des recommandations sont faites à HQ, en proposant l'un des deux modèles comme alternative de solution pour la reconstitution des séries d'ANR historiques. Le modèle hydrologique (HSAMI ou HYDROTEL) retenu sera utilisé pour simuler les apports journaliers de débits et illustrer ainsi la cohérence météo-apport.

1.1 Problématique

La problématique est de reconstituer des ANR journaliers historiques à partir des ANR mensuels mesurés par HQ. Cette étude se situe dans le cadre général du projet d'harmonisation des séries historiques et se présente comme la suite des travaux de recherche réalisés Hosseinpour et al. (2014) et Roy (2014) dans le cadre du même projet. En effet, la désagrégation des ANR d'un pas de temps élevé à un pas de temps inférieur est largement développée dans la littérature.

A ce jour, HQ a utilisé respectivement les méthodes du bilan hydrique, du filtrage avec Kalman et d'harmonisation des séries mesurées avec d'autres séries de stations hydrométriques pour reconstituer les ANR journaliers historiques sur les différents systèmes hydriques. L'analyse des résultats obtenus montre que les séries historiques reconstituées sont entachées d'irrégularités, et d'incohérence. Les séries ANR journalières historiques disponibles chez HQ sont inexploitable pour les objectifs de gestion escomptés. Ces séries de données journalières obtenues par HQ ne

permettent pas à la compagnie de les utiliser pour des besoins de planification à long terme de sa gestion des réservoirs. En effet, les séries journalières historiques sont nécessaires pour d'une part service à la calibration des modèles pour la simulation des débits futurs.

Néanmoins, HQ dispose de données journalières de bonne qualité sur une période d'environ dix ans utiles pour la calibration des modèles à utiliser dans la cadre de ce projet. La mise en place d'une démarche aboutissant à une solution pour désagréger les ANR mensuels permettra à HQ de reconstituer ses apports naturels historiques à un pas de temps journalier.

1.2 Objectifs

L'objectif principal de cette étude est de désagréger les ANR mensuels en ANR journaliers. Il s'agit premièrement de mener une étude comparative entre les modèles hydrologiques HYDROTEL et HSAMI sur la base des indicateurs de qualité, pour l'estimation des ANR selon le modèle météo-débit. Dans un second temps, il s'agit de reconstituer les ANR journaliers. L'atteinte de l'objectif principal passe par la réalisation des objectifs spécifiques ci-dessous:

- i. Validation et calibration des modèles;
- ii. Détermination des indicateurs de choix;
- iii. Détermination de la meilleure méthode;
- iv. Modéliser les apports journaliers historiques.

1.3 Plan et contenu du mémoire

Le mémoire présente respectivement les éléments suivants:

- i. La méthodologie (Chapitre 1);
- ii. La revue bibliographique (Chapitre 2);
- iii. La présentation des modèles utilisés (Chapitre 3);
- iv. La description de la zone d'étude (Chapitre 4);
- v. La validation des données d'entrée (Chapitre 5);
- vi. La validation et calibration des modèles utilisés (Chapitre 6);
- vii. La détermination de la meilleure méthode (Chapitre 7);
- viii. La présentation des résultats (Chapitre 8);
- ix. La synthèse et la discussion (Chapitre 9).
- x. La conclusion et les recommandations (Chapitre 10).

1.4 Méthodologie

La démarche utilisée permet de faire une étude de cas du système hydrique (SH) des Outardes et de Saint-Maurice. La méthode de la reconstitution des ANR journaliers historiques à partir des ANR mensuels historiques mesurés sur la période des données historiques 1965-2014, est développée dans ce mémoire. Les tâches déterminées pour chacune des étapes et la démarche menant à l'analyse finale des résultats de la désagrégation des débits mensuels en débits journaliers sont présentées. La démarche de solution est présentée aux points suivants. Les références aux chapitres correspondants sont ainsi associées à chaque section.

i. La revue bibliographique (Chapitre 2)

La revue bibliographique fait l'état de l'art sur la reconstitution des apports naturels et la désagrégation des apports naturels en général. L'utilisation des méthodes stochastiques, déterministes et hydriques pour la désagrégation est présentée.

ii. La présentation des modèles utilisés (Chapitre 3)

Les modèles hydrologiques HSAMI (modèle global) et HYDROTEL (modèle semi-distribué) sont présentés. Le modèle PHYSITEL complémentaire à HYDROTEL, utilisé pour la modélisation des conditions de terrain est présenté.

iii. La description de la zone d'étude (Chapitre 4)

La zone d'étude considérée prend en compte les différents BV des SH des Outardes et de Saint-Maurice, considérés à des différents niveaux de l'étude. En effet, tous les BV des SH des Outardes et de Saint-Maurice sont étudiés, au niveau de la validation des données d'entrée et de la calibration des modèles utilisés. Le BV Beaumont du SH de Saint-Maurice est utilisé comme étude cas pour la reconstitution des séries journalières dont les résultats sont présentés de ce mémoire.

iv. La validation des données d'entrée (Chapitre 5)

Cette étape permet de présenter et de valider les données d'entrée à utiliser. Il s'agit dans un premier temps de présenter respectivement les séries hydrométriques et les séries. Dans un second temps, il a été question de valider les séries hydrométriques et les séries météorologiques présentées. Les résultats de validation des données d'entrée des BV des SH des Outardes et de Saint-Maurice sont présentés.

v. La validation et la calibration des modèles (Chapitre 6)

La validation et la calibration permettent l'utilisation des modèles HSAMI et HYDROTEL pour la désagrégation des apports mensuels en apports journaliers. La démarche de calibration et de validation des modèles passe par les objectifs spécifiques suivants:

- définir l'optimiseur optimal et des fonction-objectifs;
- définir le nombre maximal d'évaluations, et la taille de la population de la calibration en tenant compte de la qualité des paramètres obtenus versus les temps de calcul nécessaires;
- définir les seuils d'acceptabilité et de sauvegarde des paramètres optimaux.

Les résultats de la calibration des BV des SH des Outardes et de Saint-Maurice sont présentés.

vi. Le Choix de la méthode adéquate (Chapitre 7)

Les indicateurs de choix aussi appelés indicateurs qualité sont définis en collaboration avec HQ afin de mener l'étude comparative des modèles HSAMI et HYDROTEL dans le cadre opérationnel de HQ. Les critères de qualité sont basés sur la qualité des résultats et les coûts d'opération.

En plus de l'aspect quantitatif des débits journaliers simulés, l'aspect des coûts d'opération est pris en compte pour l'étude comparative afin de déterminer la meilleure approche (choix entre HSAMI et HYDROTEL) pour reconstituer les séries d'apports historiques d'HQ.

vii. La présentation des résultats (Chapitre 8)

Les résultats obtenus suite à l'étude d'un BV Beaumont du SH de Saint-Maurice seront présentés et analysés. Cette partie met en évidence les données significatives, les illustrations des résultats du BV Beaumont. Le BV de Beaumont est utilisé car en plus des données d'entrée, la grille météorologique est aussi disponible.

viii. La synthèse et les recommandations (Chapitre 9 et Chapitre 10)

Cette partie présente la discussion de l'analyse des résultats, la critique de la recherche pour une validation interne et externe des recommandations et résultats. La portée des résultats est établie. Les perspectives de recherche future pour bonifier les résultats seront proposées.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Reconstitution des apports naturels

Une estimation des séries d'apports naturels de qualité entrant dans un réservoir est importante. Elle permet d'appréhender et de connaître la disponibilité de l'eau dans les réservoirs. Les avantages de la disponibilité des séries d'apports journaliers de qualité, sont aussi liés à la planification et à la gestion des systèmes hydriques. La reconstitution des apports naturels permettra à HQ d'avoir une série de débits journaliers sur de grandes périodes. Les séries d'apports journaliers sont utilisés par faire les différentes simulations nécessaires et surtout pour analyser les événements extrêmes avenir. HQ a besoin de disposer de séries d'apports journaliers pour sa politique de gestion et de planification de la production hydroélectrique.

L'analyse et le traitement des séries d'apports journaliers permettent de prédire la durée des événements critiques et le comportement d'un système hydrique contenant les réservoirs. La planification et la gestion seront mieux appréhendées avec précision, selon la qualité des séries de données disponibles dépendamment de leur échelle de temps (Montaseri et Adeloey, 1999).

La gestion et la coordination efficace des SH améliorent nettement les avantages au niveau des systèmes d'irrigation et d'hydroélectricité d'environ 3-12% (Jeuland, Baker, Bartlett et Lacombe, 2014). En outre, des conséquences financières découlent inévitablement de la bonne gestion des réservoirs.

La méthode de reconstruction des apports naturels développée par Hirsch (1982) a permis de reconstituer les apports naturels en conservant des variabilités annuelles de débits à l'intérieur d'un SH. Ce résultat montrait la présence et l'impact de système nival, ce qui corrigeait les hydrogrammes annuels aplatis. Ces hydrogrammes aplatis étaient obtenus lors de la reconstitution des apports naturels au pas de temps annuels (Hernández-Henríquez, Mlynowski et Déry, 2010).

L'analyse de l'impact des barrages sur la qualité des débits reconstitués avec la méthode précédente a été réalisée. Cette analyse montre que la variabilité interannuelle des débits est fonction du régime hydrologique associé à un système hydrique (Assani, 2004).

L'équation du bilan hydrique est utilisée comme une méthode de reconstitution des séries de débits pour des réservoirs d'approvisionnement en eau implantés sur des bassins non jaugés. Les

séries générées utilisées dans les simulations produisent des résultats de bonne qualité pour les demandes en eau mensuelles constantes. Cette étude ne prend pas en compte la variabilité des demandes mensuelles (Shiau et Lee 2005).

L'approche utilisant le Bilan hydrique, développée par Shiau et Lee (2015) a été appliquée à des ensembles de réservoirs installés dans un grand système hydrique. L'analyse des résultats obtenus montre que la capacité de stockage des réservoirs a une grande influence sur les débits sortant du système hydrique (Gunter, Krol, Araújo et Bronstert, 2004). Cette méthode serait difficile à appliquer ici, car la méthode recherchée devra être capable de reconstituer les ANR pendant les périodes avant et après la mise en eau des réservoirs.

Une Approche de correction des séries chronologiques générées utilisant de l'équation classique du bilan hydrique est proposée par Hosseinpour et al (2014). La correction utilise le filtre de Kalman pour la période pré-réservoir et le bilan hydrique au niveau déterministe et stochastique pour la période post-réservoir. L'approche permet d'améliorer les séries de données générées en éliminant des débits négatifs et en lissant les hydrogrammes (Hosseinpour et al., 2014).

2.2 Désagrégation des apports naturels

Cette section de l'étude bibliographique présente les approches de solutions liées aux méthodes stochastiques dans un premier temps, dans un second temps aux méthodes déterministes et finalement aux méthodes hydrides.

La désagrégation est une technique qui date de très longtemps. Elle est utilisée aujourd'hui pour distribuer des débits de grande échelle temps à de petites échelles de temps. Cette approche se base sur l'hypothèse de l'existence d'une interaction entre le flux à grande échelle de temps d'un bassin et les caractéristiques physiques du bassin (la topographie, la distribution terre-océan, l'usage du sol, etc.) selon Hans, Heike et Frauke, (2000).

Plusieurs approches de solutions identiques à la désagrégation ont déjà été utilisées dans le passé pour générer des séries chronologiques de données météorologiques à partir des modèles numériques de prédiction du temps à grande échelle (William et Harry, 1974).

2.3 Méthode stochastique

Un algorithme a été développé par Hughes et Smakhtin (1996) de manière très simple pour générer une série de données journalières précisément dans le but de compléter et prolonger des séries chronologiques des débits. Cette approche utilise les courbes de valeurs de débits observés journalières classées de chaque mois de l'année provenant de stations localisées aux environs du site à l'étude comme repère. Les courbes classées et les hydrogrammes historiques des stations de référence sont utilisées pour la calibration d'un algorithme de calcul. Cet algorithme intégré au HYMAS, est ensuite utilisé pour simuler les débits journaliers par interpolation à partir de débits observés dans les différentes stations hydrométriques. Les stations hydrométriques choisies sont situées sur des bassins ayant des caractéristiques hydrologiques voisines au BV simulé dans le projet. L'utilisation de cet algorithme donne des résultats sur les différents bassins versants comparables à ceux obtenus par l'application du modèle hydrologique pluie-débit VTI. La limitation majeure de cette méthode demeure la difficulté à trouver des BV ayant les caractéristiques hydrologiques semblables au site à l'étude (Hughes et al., 1996).

Une approche utilisant la technique stochastique non paramétrique développée par Prairie, Rajagopalan, Lall, et Fulp, (2007) a été utilisée pour désagréger les débits annuels en débits mensuels. Les simulations sont faites selon le temps et l'espace, en se basant sur les informations climatiques à grande échelle (Prairie et al., 2007). L'analyse des résultats montre la conservation d'une bonne corrélation des moyennes des débits entre le site ciblé et le site de référence. La méthode utilisée permet aux séries chronologiques générées de conserver les propriétés de dépendance et de distribution spatiales à tous les endroits. La méthode non paramétrique présentée ici est incapable de saisir la corrélation entre les mois de janvier de l'année suivante et de décembre de l'année précédente. Les valeurs de débits extrêmes mensuels ne sont pas bien illustrées.

Dans le but de conserver les attributs statistiques et la corrélation des variations dans les séries chronologiques générées, un algorithme non paramétrique basé sur le principe de la multiple désagrégation simultanée est appliqué. Cette approche permet de désagréger les séries mensuelles en séries journaliers en utilisant comme repère les séries chronologiques de plusieurs sites références sélectionnés. Ces sites ont les mêmes caractéristiques hydrologiques que le site à étudier (Kumar, Lall et Petersen, 2000). L'analyse des séries chronologiques générées montre que

cette méthode fournit des résultats satisfaisants qui tiennent compte de l'espace et du temps. Mais la difficulté à trouver des BV ayant les caractéristiques hydrologiques semblables au site à l'étude demeure le défi majeur comme toutes les autres méthodes présentées. La disponibilité des séries de débits journaliers sur les sites références, pour les périodes à l'étude, est toujours difficile à réaliser, car les périodes de série de données disponibles sont très récentes.

Par ailleurs, des modèles d'écoulement fluvial stochastiques sont utilisés pour générer des séquences chronologiques de débits journaliers en utilisant les caractéristiques statistiques des séries journaliers provenant d'autres sites jaugés (Yureklie, Kurunc, et Ozturk, 2005). Les résultats sont capables d'aider à la conception et à la gestion de réservoirs. Cependant, l'utilisation des résultats connaît des faiblesses, car les séries générées ne prennent pas très souvent compte des périodes de sécheresse et de grandes inondations. Cette méthode considère aussi que les paramètres et les caractéristiques d'un bassin restent identiques tant pour le passé, le présent que pour le futur.

La méthode K-NN est utilisée pour générer les débits au pas de temps journaliers. Le défi dans cette étude était de faire une désagrégation basée sur une estimation judicieuse des paramètres et surtout maintenir la continuité de l'écoulement à travers la période limite de temps de désagrégation. Il s'agit de la continuité entre les mois de janvier et celui de décembre et également entre le dernier jour de décembre et le premier jour de janvier. La méthode du K-NN de désagrégation utilise les paramètres statistiques des stations repères. Des pondérations variables sont appliquées à chaque station repère pour la génération de chaque débit journalier (Nowak, Nowak, Prairie, Rajagopalan, et Lall., 2010). Cette approche permet de préserver les caractéristiques statistiques des séries provenant des stations repères (variance, asymétrie et valeurs maximales et minimales). Le choix des stations repères et la disponibilité des séries journalières sur une longue période demeurent le défi à relever.

La désagrégation des débits mensuels en débits journaliers utilisée est réalisée (Acharya, A. et Ryu, J. (2014) en utilisant une méthode relativement simple, dite flexible et adaptative. Elle consiste à choisir les stations cibles ayant des données journalières enregistrées. La méthode utilise les débits des stations cibles comme unique variable de décision dans la désagrégation. Ces stations devront avoir des caractéristiques hydrologiques semblables au bassin à l'étude. Les références de cumul des débits à l'intérieur de trois mois sont utilisés comme critère de

ressemblance entre les stations cible et repères au niveau du choix des stations repères (Acharya, et Ryu, 2014). Cette approche reflète les caractéristiques statistiques des séries enregistrées au niveau de celles générées et permet de conserver le bilan de masse. Le choix des stations cibles de caractéristiques hydrologiques semblables au BV à l'étude demeure la difficulté d'application de cette méthode.

Une méthode utilisant les hydrogrammes synthétiques est mise en œuvre par Bayazit et Aksoy (2001). Cette approche de reconstitution basée sur la théorie des ondelettes est utilisée pour la génération synthétique de séries hydrologiques. Cette méthode se positionne comme un outil non paramétrique de génération de données. Elle a pour objectifs fondamentaux, la décomposition des séries chronologiques dans le domaine temps-fréquence et la reconstruction de nouvelles séries chronologiques, (Bayazit et Aksoy, 2001). Elle a l'avantage de préserver les caractéristiques statistiques (la valeur moyenne et l'auto corrélation) de la série temporelle observée. Les résultats montrent malheureusement que l'asymétrie des données n'est pas préservée.

La génération synthétique des séries de données est utilisée par Wang, Hu et Li (2011) également, en se basant sur l'utilisation de lois de probabilité (normal ou Pearson type III). Elle est utilisée pour générer des séries chronologiques quotidiennes. Elle consiste à l'utilisation d'un algorithme de reconstruction qui est moins sensible à la longueur des séries historiques de référence (Wang et al., 2011). Cette approche a l'avantage de permettre la prise en compte des attributs de dépendance et des propriétés statistiques des données enregistrées. L'approche est assez innovante pour la production de l'hydrologie stochastique. Le défi majeur réside au niveau du choix des séries de références qui doivent être représentatives des caractéristiques hydrologiques du site à l'étude.

Les paramètres sont calibrés en fonction du temps afin que les séries chronologiques générées rendent compte des débits maximaux et minimaux des séries enregistrées. Une méthode de génération synthétique est utilisée pour générer des données quotidiennes. L'analyse des résultats obtenus montre que l'approche permet de conserver les caractéristiques des séries de données observées (Niu et Sivakumar, 2013).

Une étude conduite par You, G., Thum, B., et Lin, F. (2014) a permis d'évaluer différents modèles de désagrégation de séries de données. L'étude procède par une approche basée sur la génération synthétique des séries chronologiques. L'analyse des résultats montre que les modèles

de simulation directs (bruit de coup de feu et fonde-Markov) sont capables de conserver les moyennes mensuelles et les débits annuels maximum quotidiens avec efficacité. Les modèles de régression linéaire de Parme et non paramétrique modifié K-NN associé au Bootstrap non paramétrique représentent efficacement les séries de données journalières dans la même étude (You, Thum, et Lin, 2014).

2.3.1 Méthode déterministe de désagrégation

Une étude basée sur une approche déterministe non linéaire a été utilisée par Sivakumar, Wallender, Puente, et Islam (2004) pour générer des séries de débits journaliers. Cette méthode développée se base sur la dynamique de la répartition spatiale et sur la méthode du plus proche voisin (Sivakumar et al., 2004). L'analyse des résultats montrent que cette méthode permet de bien représenter les ANR. Cette approche a une précision limitée lorsqu'elle est appliquée sur des grands bassins.

Un modèle d'optimisation multi-objectif est utilisé dans une étude. Les simulations ont permis de générer des débits d'entrée journaliers synthétiques qui conservent les caractéristiques statistiques des données historiques. Cette approche démontre sa capacité à réduire les impacts des inondations. L'analyse des résultats a montré que l'intégration de données générées dans le modèle de gestion quotidienne des réservoirs, fournit des résultats satisfaisants. Mais, l'approche utilisée ici ne s'applique pas à la gestion de SH de plusieurs réservoirs (Yang et Cai, 2011).

Une étude permet d'approfondir l'approche utilisée par Yang et Cai en 2011. Cette étude portant sur la gestion des réservoirs réalisée par Wang, Brill, Ranjithan, et Sankarasubramanian (2015), a permis d'explorer une approche de désagrégation des débits mensuels en débits quotidiens. L'approche permet tout d'abord de produire des séries de données mensuelles. Les séries données futures contenant les prévisions de précipitations maillées et des estimations d'humidité du sol sont utilisées comme des données d'entrée du modèle. L'utilisation des résultats obtenus permet d'évaluer la flexibilité de la gestion des réservoirs par rapport aux prévisions de débits mensuels et les écoulements journaliers utilisés dans l'étude. Une méthode non paramétrique est choisie pour désagréger les prévisions de débits mensuels en débits journaliers. Cette approche de désagrégation est faite en utilisant les données climatiques journalières, les conditions d'écoulement journalier et surtout la variabilité des débits mensuels (Wang et al. 2015).

Des études ont été menées par Hwang, S. et Graham, W. D (2013), sur des bassins versants ayant une grande variabilité journalière spatiale de précipitations. La méthode BCSA appliquée a permis de réduire l'échelle des données de grande échelle temporelles à des séries de différentes échelles de temps (mensuel à journalier). Cette approche permet de désagréger les données atmosphériques et de température sur la base temporelle et spatiale. La particularité de cette approche est qu'elle produit des résultats satisfaisants seulement si les séries de données observées pour la calibration sont de très bonne qualité. La qualité des séries de références dépend de la corrélation spatiale des séries climatiques (Hwang, S. & Graham, W. D, 2013).

La présente étude proposée par Hwang, S. et Graham, W. D. (2014) permet de tester les différentes approches de désagrégation des débits mensuels en débits journaliers. Le modèle de désagrégation spatiale et de correction de polarisation journalier (BCSD), la version modifiée du BCSD (SDBC) et le modèle stochastique de correction de polarisation et d'analogie (BCSA) sont évalués sur leur capacité à générer des séries de données journalières. Les modèles ci-dessus étudiés utilisent comme données d'entrée les précipitations et la température. La calibration des différents modèles est faite en utilisant les données de quatre (4) différentes stations cibles ayant les caractéristiques hydrologiques similaires au bassin à l'étude (Hwang, et Graham, W. D, 2014). L'analyse des résultats montre que toutes les approches de désagrégation utilisées donnent des séries calculées ayant des moyennes quotidiennes similaires aux moyennes des séries observées sur la période de la saison sèche d'octobre à mai. Cependant sur la période de juin à août, une sous-estimation des débits pour tous les différents modèles étudiés est observée. Outre la précision pendant les périodes humides, les séries générées permettent de prévoir avec exactitude l'ampleur et la fréquence des événements extrêmes. L'un des défis majeurs pour l'application de ces méthodes, est de trouver des stations ayant des séries de débit journalier disponibles sur les différentes périodes à étudier.

Une méthode développée par Giroto, M., Cortés, G., Margulis, S. A., et Durand, M. (2014) permet de générer des débits sur la base spatiale et temporelle, provenant de la fonte des neiges. Les séries de débit sont générées en utilisant un modèle terrain et une courbe de fonte des neiges. Les données d'entrée du modèle utilisé sont les séries météorologiques et les séries hydrométriques observées (Giroto et al., 2014). En général, la méthode appliquée sur les différents bassins, atteste la capacité du modèle à représenter les périodes de faibles débits (période de sécheresse). Cette méthode a la particularité d'être applicable que sur des petits

bassins versants. En effet, les résultats obtenus sur des bassins versants plus grand manque de cohérence. Cette méthode ne peut donc pas être utilisée dans notre projet de reconstitution des apports historiques journaliers.

2.3.2 Méthode hybride

La méthode hydrique est une approche de solution qui prend en compte les aspects stochastiques et déterministes de l'estimation des débits journaliers.

Une forme améliorée du modèle hybride de simulation stochastique est proposée Srinivas, et Srinivasan (2006) pour désagréger des apports au pas de temps saisonnier. Cette étude se présente comme une amélioration du HMBB, ‘‘Hybrid Moving Block Bootstrap’’ présenté par Srinivas and Srinivasan en 2001. Ce modèle fournit de bon résultat pour les données hydrologiques ayant de longues dépendances dans les séries historiques. Il est également efficace lorsque la série historique présente une non-linéarité. L'utilisation d'un modèle paramétrique associé à cette méthode pourrait permettre de conserver les attributs de dépendance à long terme (Srinivas et Srinivasan, 2006). L'analyse des résultats confirme que le modèle proposé possède une flexibilité et une efficacité de conservation des propriétés de dépendance à court terme. Au niveau de la conservation de la dépendance à long terme, la méthode connaît des faiblesses car la dépendance à long terme devient presque inexistante.

Dans l'optique d'améliorer les méthodes stochastiques existantes, des modèles contenant des variables supplémentaires ont été développés et utilisés par Ng (2010). Ces modèles permettent d'intégrer les différents paramètres comme les précipitations mensuelles, l'utilisation des terres, la variabilité du climat, les activités humaines, etc. Cette approche se distingue des modèles traditionnels stochastiques de simulation des séries chronologiques de débits basés uniquement sur l'historique de l'écoulement fluvial. En prenant en compte d'autres paramètres, cette approche a l'avantage de battre en brèche l'idée de supposer que le climat précédent, l'utilisation des terres et l'utilisation de l'eau sont des données stationnaires (Ng, 2010).

Face à la difficulté d'avoir des séries chronologiques de débits journaliers sur de longues périodes dans les stations repères, un modèle stochastique est conçu. Ce modèle est utilisé pour générer des séries chronologiques journalières. L'étude ici, met un accent particulier sur la mise en place de séries chronologiques dans les stations repères dans l'optique de simuler des débits futurs liés

aux prévisions climatiques futures. Ce modèle est capable de générer différentes séries demandées à partir du ré-échantillonnage des séries de données observées dans des stations repères. La méthode de ré-échantillonnage des débits observés permet d'avoir de longues séries de données repères (Haberlandt, 2014). Cette méthode est une application de la méthode KNN des points les plus proches. Elle a l'avantage d'intégrer la prise en compte des caractéristiques climatiques. L'analyse des résultats simulés rend compte des caractéristiques statistiques des données observées. L'approche possède néanmoins des limites, car si des BV ayant les mêmes caractéristiques physiques, hydrologiques que les BV à l'étude ne sont pas trouvés, les résultats ne sont pas représentatives du comportement hydrologique des BV analysés.

Une approche proposée par Wang et Fu (2014), qui utilise les prévisions de précipitations à partir de modèles climatiques et les estimations de l'humidité du sol à partir de modèles hydrologiques est utilisée. Elle est non paramétrique et est utilisée pour désagréger les apports prévisionnels du pas de temps mensuels à un pas de temps de 10 jours. Les données historiques de pas de temps de 10 jours provenant de bassins proches sont utilisées pour calibrer le modèle. En plus de générer les apports sur un pas de temps de 10 jours, cette étude permet aussi de valider les valeurs d'estimations de l'humidité des sols et surtout permet d'actualiser les prévisions de débits. Les résultats acquis avec la présente méthode ont été comparés à ceux obtenus en utilisant la méthode de génération des débits synthétiques. L'analyse des résultats montre que la prise en compte des données de pluviométrie et d'humidité permet d'améliorer les séries chronologiques générées. Cependant, en plus de trouver des bassins ayant des caractéristiques proches du bassin étudié, la difficulté de trouver des grilles des données de prévisions de précipitations et d'humidité des sols sur les bassins et les périodes à étudier demeure un défi majeur pour cette méthode (Wang, H. et Fu, X. 2014).

CHAPITRE 3 MODÈLES HYDROLOGIQUES UTILISÉS

Trois différents modèles sont présentés dans ce chapitre. Le modèle HYDROTEL et son modèle complémentaire PHYSITEL sont présentés premièrement, suivi du modèle HSAMI.

3.1 Le modèle semi distribué: HYDROTEL

L'utilisation du modèle HYDROTEL pour la désagrégation des ANR mensuels en ANR journaliers prend en compte les deux composantes (PHYSITEL & HYDROTEL) essentiels à utiliser. Ces deux comparantes sont respectivement utilisées pour la modélisation des conditions physiques et des conditions hydrologiques d'un bassin versant à étudier.

3.1.1 Le modèle HYDROTEL

HYDROTEL est un modèle semi-distribué qui permet de faire des calculs hydrologiques en divisant le BV en plusieurs unités hydrologiques relativement homogènes (UHRH). Il permet par ce principe de prendre en compte dans son calcul des variations du comportement hydrologique sur chaque UHRH. Chaque UHRH possède des paramètres personnalisés de la topographie du site, du type de sol, de l'occupation du sol et des données météorologiques (pluie, neige, température). Différentes améliorations sont en cours pour rendre le modèle HYDROTEL plus robuste et conviviale. Ces améliorations prennent aussi en compte la capacité du modèle HYDROTEL à intégrer aisément d'autres formats de fichier.

Les processus hydrologiques et les algorithmes correspondants disponibles dans le modèle HYDROTEL sont présentés en annexe A. En Effet, La méthode des moyennes pondérées des trois stations les plus proches est utilisée pour le processus d'interpolation des données météorologiques pour compléter et/ou remplacer les données manquantes ou erronées. La méthode mixte degrés-jours et bilan énergétique est utilisée pour le processus du couvert nival, afin de simuler l'évolution du couvert de neige au sol en fonction de l'accumulation la fonte et la neige des précipitations solides. Le processus de l'évapotranspiration potentielle (ETP) est pris en compte par l'utilisation de l'algorithme de Thornthwaite Cette algorithme a été utilisé car son équation est moins exigeante en données d'entrée. Le bilan d'eau vertical est calculé par le bilan vertical en trois couches. L'écoulement sur le bassin et dans le réseau hydrographique sont calculés par l'algorithme de l'onde cinématique.

Le modèle HYDROTEL reçoit pour son fonctionnement trois types de données d'entrée qui sont:

- i. **Le fichier des données intermédiaires :** Ces fichiers contiennent des données de précipitations et de températures déjà interpolées sur les UHRH regroupées en BV. Ces fichiers contiennent précisément des données de température maximale et minimale, des précipitations solide ou liquide.
- ii. **Les données des stations hydrométriques :** Il s'agit ici des séries de débits observées disponibles dans les différentes stations hydrométriques sélectionnées pour l'étude.
- iii. **Les grilles de prévisions :** Ces grilles contiennent essentiellement un fichier annexe qui regroupe les données de températures minimales, températures maximales et les précipitations totales.

3.1.2 Le modèle PHISITEL

Le modèle PHYSITEL a été développé par HQ et le MDDELCC, pour répondre à un besoin d'outil complémentaire au modèle HYDROTEL. Le modèle PHYSITEL modélise avec précision l'état physique et les réseaux hydrographiques d'un bassin versant à partir du modèle numérique d'altitudes (MNA). En effet, le modèle PHYSITE permet de:

- i. monter le modèle numérique d'altitudes (MNA) nécessaire pour la représentation matricielle de la topographie du BV;
- ii. déterminer la structure de l'écoulement principal du BV. Sur chaque UHRH, les directions d'écoulement sont définies. Des ensembles de UHRH sont associées aux différents tronçons de la rivière;
- iii. structurer les données liées à l'occupation du sol par UHRH. En effet, l'occupation des sols fait référence au type de végétation à la surface du sol, à la présence de roche affleurant des zones imperméables, à la présence des routes et des zones urbaines ou industrielles. L'analyse des images de télédétection permettent de déterminer les pourcentages des différentes occupations sur chaque UHRH;
- iv. structurer les données liées aux types de sol des BV excluant les parties rocheuses allant des sables aux argiles. Les types de sols par leur ramification sont utilisés comme des indicateurs pour la discrétisation des UHRH;
- v. construire les fichiers relatifs à la base de données qui décrivent le bassin versant à utiliser par le modèle HYDROTEL.

La Figure 3.1 présente les étapes de modélisation d'un bassin par le modèle Physitel.

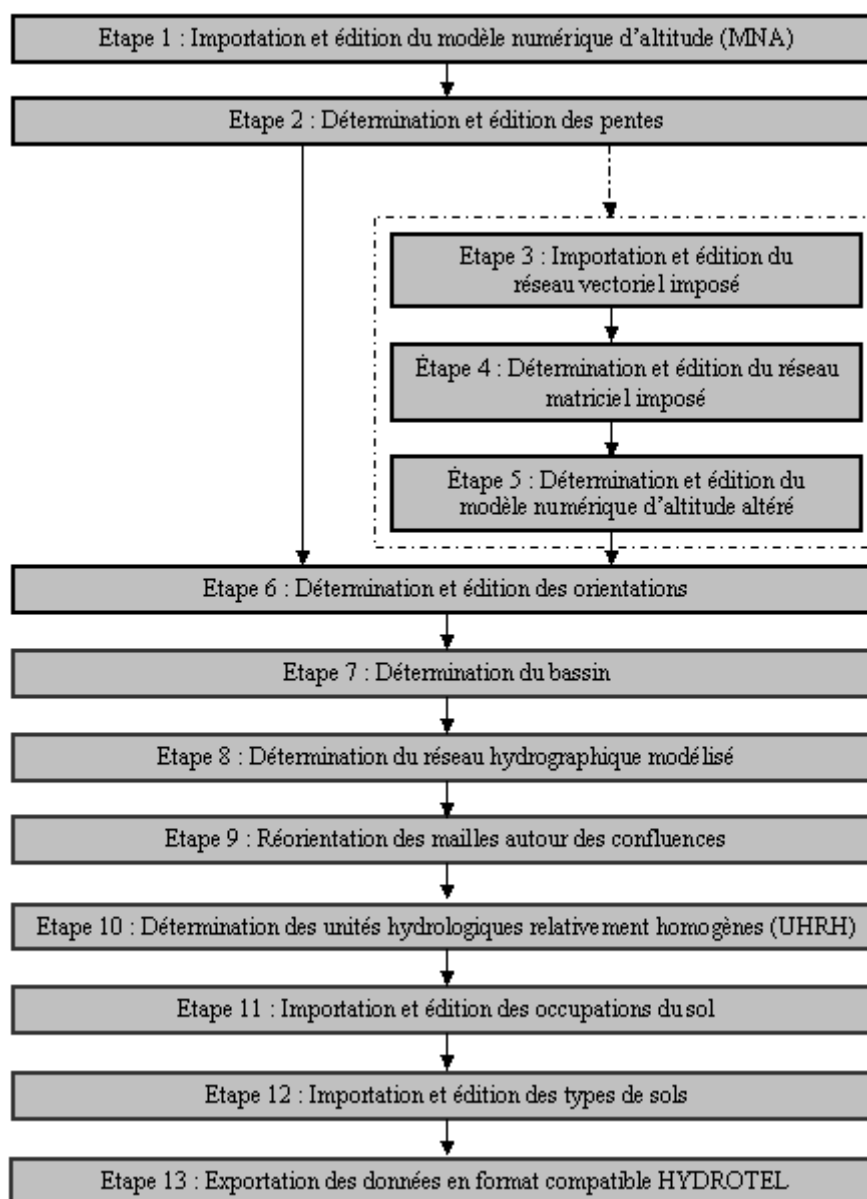


Figure 3.1: Étapes de modélisation d'un bassin avec PHYSITEL (Fortin et al., 2004).

La Figure 3.1 permet de construire les fichiers descriptifs du BV au travers des 13 étapes de modélisation. Les facteurs suivants peuvent influencer la performance et la qualité des données fournies par le modèle PHYSITEL:

- i. La taille de la matrice décrivant le relief en fonction du maillage des cellules d'altitude;
- ii. L'importation et la projection des données dans le système de PHYSITEL;

- iii. La correction des valeurs aberrantes et inexistantes en utilisant un SIG afin de faire des extrapolations et/ou interpolation pour estimer les données inutilisable ou manquantes;
- iv. Le degré de ramification et édition pour fins de conformité qui prend en compte la complexité de certains réseaux hydrographiques, le facteur de précision au niveau des connectivités des ramifications des réseaux hydrographiques, etc.;
- v. La validation de la conformité du réseau matriciel imposée;
- vi. La correction des orientations qui permet de réduire la fréquence des erreurs dans l'orientation des sens d'écoulement;
- vii. Le degré de ramification du réseau modélisé liée au nombre d'Unité Hydrologique Relativement Homogène (UHRH) créé pour tenir compte de la précision des caractéristiques topographiques, des classes d'occupation du sol et des types de sols en fonction des objectifs de la simulation.

3.1.3 Le modèle global: HSAMI

Le modèle HSAMI disponible chez Ouranos par HQ, est un modèle global qui permet la représentation d'un BV étudié comme un élément spatiale homogène. La variabilité des aspects physiques et hydrologiques du BV étudié n'est pas explicitement prise en compte avec HSAMI.

Le modèle HSAMI permet de modéliser la relation météo-apport utilisant les réservoirs comme base pour la simulation des apports naturels tant dans un réservoir qu'à l'exutoire d'un BV étudié. Par l'utilisation des hydrogrammes unitaires, HSAMI fournit des sorties filtrées en utilisant les réservoirs en cascade (Fortin, 2000). Le schéma décrivant les étapes simplifiées de la modélisation d'un BV par le modèle HSAMI est présenté en annexe B.

Le modèle HSAMI utilise un système d'équations et de paramètres empiriques pour simuler les différents processus suivants :

- i. l'évaporation dans les zones saturées et sur le réservoir;
- ii. la fonte de la neige;
- iii. l'évapotranspiration;
- iv. la saturation du sol et le gel au sol;

Le tableau des paramètres à calibrer pour l'utilisation de HSAMI sont présentés en annexe C.

3.1.4 Synthèse des modèles HSAMI et HYDROTEL

L'analyse des données du Tableau 3.1 permet de confirmer l'énoncé de l'hypothèse de la prédominance de la précision des résultats à fournir par HYDROTEL sur celle fournie par HSAMI.

Le modèle HYDROTEL est sur paramétré par rapport au modèle HSAMI. L'acquisition des données pour le Modèle HYDROTEL prend en compte plusieurs facteurs qui impactent les coûts d'opération.

Tableau 3.1 : Présentation succincte des deux modèles hydrologiques

HSAMI	HYDROTEL
Modèle global	Modèle semi-distribué
Moins de paramètre d'entrée Peu de paramètre	Sur paramétré
Optimisation automatique des paramètres	Optimisation automatique des paramètres
Moins coûteux (à valider)	Besoin de discrétisation de certaines données Besoin de plus de ressources de calcul en termes de puissance Plus coûteux (à valider)

Les paramètres à calibrer sont liés aux différents éléments à considérer et surtout du niveau de précision des données d'entrée. L'acquisition des données d'entrée, gage de la qualité des résultats nécessite des ressources liées au niveau de précision des résultats attendus.

CHAPITRE 4 DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Le présent chapitre a pour objectif principal de présenter les systèmes hydriques à l'étude.

Dans un premier temps, il est question de localiser la zone d'étude et de décrire les principales caractéristiques naturelles des différents bassins. Cette étape permet d'appréhender la dynamique hydrologique de ce système hydrique.

Dans un second temps, le système hydrique et ses composantes seront présentés. Les SH des Outardes et de Saint-Maurice contiennent chacun respectivement trois (3) et douze (12) sous-bassins versants analysés dans la présente étude. Les données hydrologiques des quinze (15) sous-bassins ont été collectées pour la plupart sur la période de 1965 à 2014.

Le Tableau 4.1 présente la synthèse des informations concernant les bassins versants et les stations hydrologiques localisés sur les SH des Outardes et de Saint-Maurice.

Tableau 4.1 : Synthèse des bassins et des stations hydrométriques

Système hydriques	bassin	Stations météo	
	Nom	Numéro	Nom
Outardes	Outarde 2	062209	Manouane
		062210	Aux serpents
	Outarde 3	070704	Betsiamites
		071401	Godbout
	Outarde 4	072201	Des rapides
		072302	Aux Pekans
Saint Maurice	Beaumont		
	Gouin		
	Grand-mère	050119	Matawin
	Grand-Mère au Mekinac		
	La tuque	050135	Croche
	Manouane A-B-C		
	Mekinac	050144	Vermillon
	Rapide-Blanc a C et Gouin		
	Taureau	050409	Bras du nord
	Trenche		
	Mekinac	061901	Ashuapmushuan
	Shawinigan et La Gabelle		

4.1 Système hydrique des Outardes

Situé sur la côté nord du Québec, le système hydrique des outardes couvre un bassin versant d'une superficie estimée à environ 18906 Km². Le SH des Outardes est aménagé sur la rivière aux Outardes, qui prend sa source au lac Pléti et parcourt une longueur totale d'environ 417km. Le bassin versant est alimenté par un régime de précipitation liquide et solide.

Cette rivière possède un débit moyen de 389 m³/s. Le SH des Outardes est composé de trois centrales hydroélectriques aménagées pendant la période 1960 à 1970, ayant les puissances suivantes :

- i. Barrage - Centrale Outardes 2 d'une puissance de 523 MW,
- ii. Barrage - Centrale Outardes 3 d'une puissance de 1 026 MW,
- iii. Barrage - Centrale Outardes 4 d'une puissance de 785 MW.

La Figure 4.1 présente l'aménagement et le schéma du Système Hydrique Outardes.

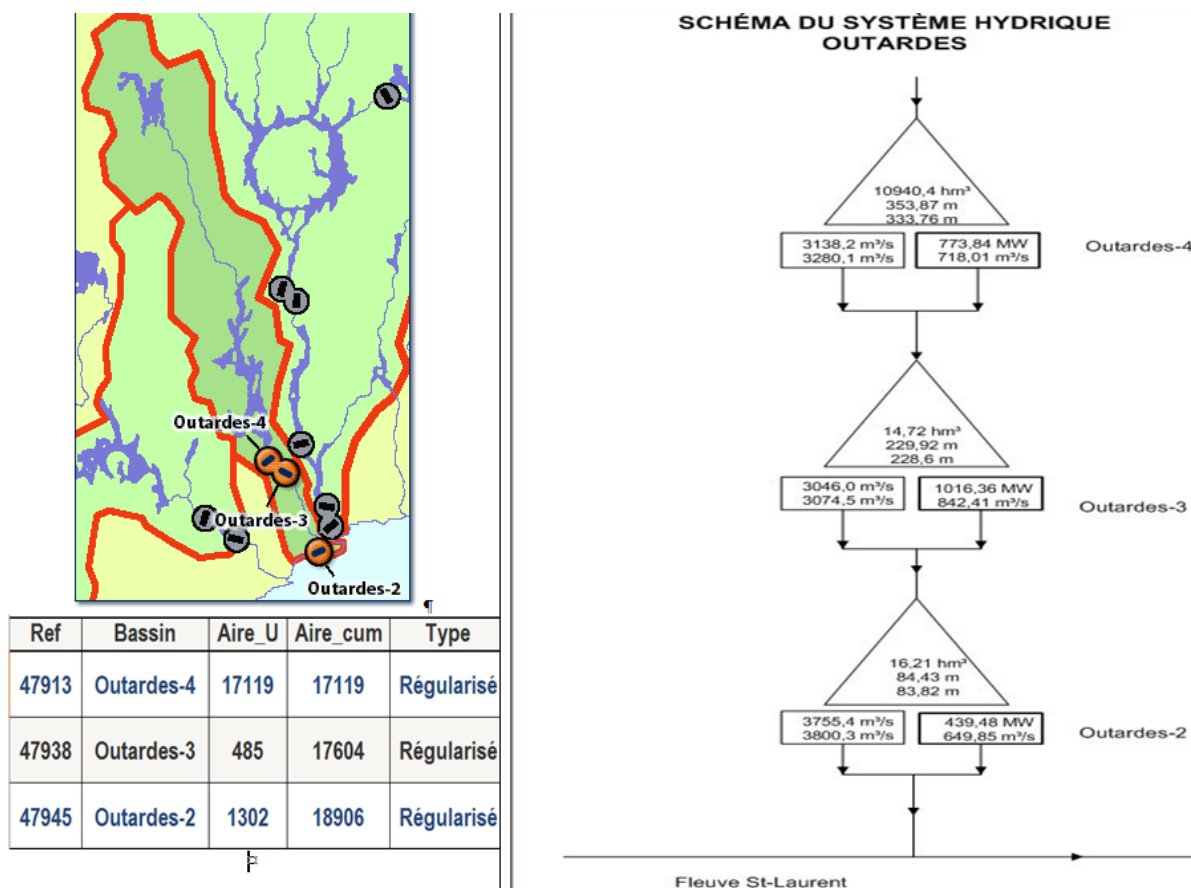


Figure 4.1: Système hydrique des Outardes (source: Hydro-Québec)

4.2 Système hydrique de Saint-Maurice

Situé sur la rive nord du fleuve Saint-Laurent, le système hydrique Saint-Maurice couvre un bassin versant d'une superficie estimée à environ 42666 Km². Le bassin est alimenté par un régime de précipitation liquide et solide. Ce système est aménagé sur la rivière Saint-Maurice, qui prend sa source au réservoir Gouin et parcourt une longueur totale d'environ 563km.

Cette rivière possède un dénivellement total d'environ 405mètres sur son parcours total. Le système contient neuf (9) centrales hydroélectriques aménagées pour la production hydroélectrique. Les Figure 4.2 et Annexe D présentent respectivement l'aménagement et le schéma du système hydrique Saint-Maurice.

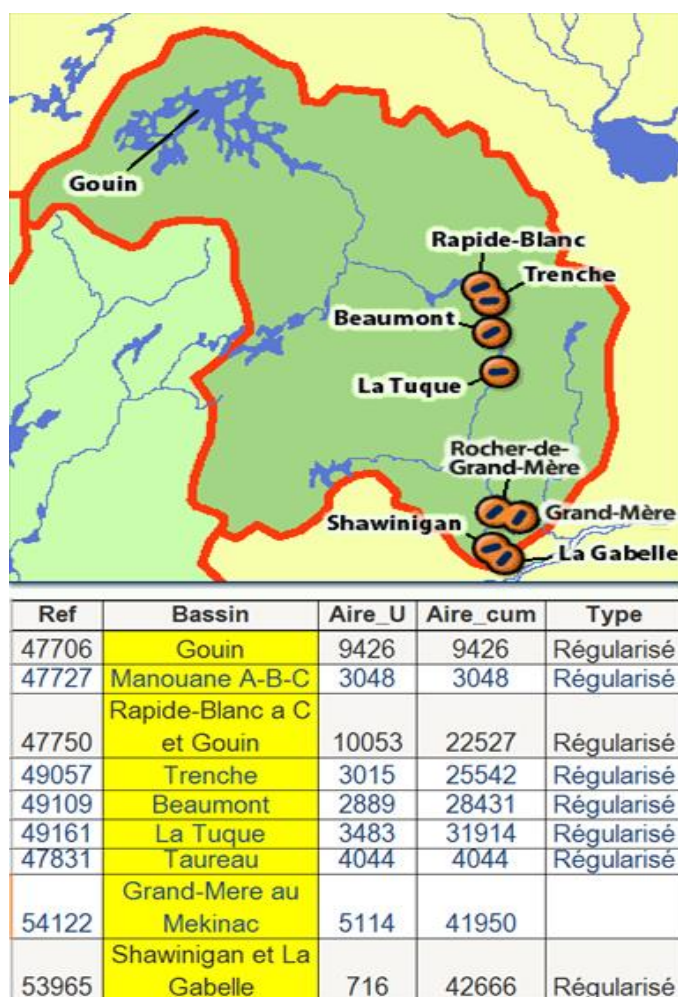


Figure 4.2: Système hydrique de Saint-Maurice (source: Hydro-Québec)

L'annexe B présente le schéma du système hydrique Saint-Maurice.

CHAPITRE 5 INVENTAIRE ET VALIDATION DES DONNÉES D'ENTRÉE

Les données d'entrée à utiliser dans la présente étude sont présentées et validées. Premièrement, l'inventaire des séries hydrométriques et les séries météorologiques est dressé. Dans un second temps, les séries de données d'entrée sont validées.

5.1 Inventaire des données d'entrée

La section suivante décrit les trois (3) sources de données hydrométriques et les quatre (4) sources de données météorologiques disponibles utilisées.

5.1.1 Les séries hydrométriques

i. Séries de données d'apports calculés:

Ces séries sont obtenues en utilisant la méthode du bilan hydrique appliquée aux différents BV.

ii. Séries de données d'apports filtrés

Les apports filtrés proviennent des apports calculés filtrés en utilisant les filtres Kalman.

iii. Séries de données d'apports harmonisés

Ces séries sont obtenues à partir des précédentes séries en utilisant les séries hydrométriques provenant de différentes stations cibles installées sur des BV similaires aux BV analysés.

5.1.2 Les séries météorologiques

i. Série météorologique de NLWIS

La série de donnée NLWIS est la propriété de l'organisme Le National Land and Water Information Service. Elle est constituée d'une grille espacée au 10 kilomètres à travers le Canada et renferme en chaque point des données journalières de précipitation (mm), de température maximale (°C) et de température minimale (°C). Cette série s'étale sur une période allant de 1961 à 2003. Ces données proviennent des stations météorologiques d'Environnement Canada. L'utilisation du modèle d'interpolation ANUsplin permet de fournir des valeurs interpolées sur toute la grille en utilisant des critères de longitude, latitude et d'altitude. Le modèle ANUsplin permet d'insérer dans le processus d'interpolation une surface spline multi variée sur un ensemble

de données bruitées, en utilisant une version non-paramétrique de la régression linéaire multi variée. Ce modèle génère des données simulées en minimisant la validation croisée généralisée.

ii. Série météorologique de SPAN

La série météorologique SPAN est disponible dans la banque de données SPAN d'HQ. Cette série est disponible sur la période de 1950 à 2011. Les données proviennent des stations météorologiques d'Environnement Canada, d'HQ, d'Alcan.

iii. Série météorologique d'Ouranos

La série météorologique d'Ouranos est la propriété de l'organisme Ouranos qui étudie les impacts des changements climatiques. Cette série est disponible sur la période de 1961 à 2009. Un krigeage simple est utilisé pour l'interpolation des différentes valeurs entre les points de la grille.

iv. Série météorologique de l'IREQ

La série météorologique IREQ est la propriété de l'IREQ, l'institut de recherche affilié à HQ. Cette série contient des données journalières sur la période de 1960 à 2005. Elle est constituée d'une grille espacée au 10 kilomètres à travers un domaine couvrant le Québec, l'Ontario et le Labrador. La méthode krigeage universel a permis d'interpoler les différentes valeurs. Les co-variables retenues pour cette méthode sont principalement la latitude et la longitude. Les données proviennent des stations d'Environnement Canada, du MDDELCC et d'Alcan.

5.2 Processus de validation des données d'entrée

La validation des bases de données à utiliser est une étape très importante. Elle permet de vérifier la qualité des données entrée et d'appréhender la qualité des résultats fournis par le modèle hydrologique. Le processus de validation des données d'entrée est réalisé en deux (2) étapes.

i. Etape 1

L'étape 1 permet de traiter et valider les séries de données hydrométriques journalières existants en utilisant les différents processus entre autre: la détection de données aberrantes et des données manquantes et si possible l'imputation des valeurs manquantes, etc. Les méthodes de moyennes, de régression stochastique sont les méthodes d'imputation explorées. Le filtrage des séries est fait selon le niveau du bruit et l'aspect des données. Les séries sont aussi décomposées et analysées selon la tendance, la composante (cyclique et saisonnière) afin d'en faciliter le traitement.

ii. Etape 2

Afin d'anticiper la qualité des résultats (apports simulés) que les modèles fourniront, une analyse des séries météorologiques est réalisée pour les bassins non jaugés des SH des Outardes et de Saint-Maurice du parc de production d'HQ. Les indicateurs de qualité sont définis pour comparer les différentes séries météorologiques. L'analyse des séries météorologiques se fait avec différentes méthodes d'analyse des différences entre les séries météorologiques.

5.2.1 Les séries hydrométriques

Pour atteindre la validation des données d'entrée hydrométriques, trois analyses ont été réalisées.

i. Analyse de la qualité des données (AQD)

L'analyse AQD permet de vérifier la qualité des différentes séries disponibles (calculées, filtrées et harmonisées). Elle consiste à établir des réconciliations de volumes respectivement aux pas de temps mensuel, trimestriel et annuel. Cette démarche évalue la possibilité des différentes séries disponibles à se ressembler. La qualité des différentes séries hydrométriques en fonction des périodes est analysée. L'analyse permet de déterminer les plages de données inutilisables versus les données de qualité et celle à utiliser avec prudence. Les résultats sont présentés respectivement aux sections 0 et 5.3.2.2 pour les SH des Outardes et de Saint-Maurice.

ii. Analyse des débits spécifiques (ADS)

L'analyse ADS, débit par unité de superficie de BV exprimé en litres/seconde/km², permet généralement de comparer les débits d'écoulement moyen des précipitations solides et liquides sur les différents bassins. En effet, l'analyse ici prend en compte les étapes suivantes:

- calcul des débits spécifiques (QS) des bassins versants du système hydrique étudié;
- analyse de la variation des QS (avant et après la mise en eau, après 2005);
- analyse de l'impact des superficies des bassins sur la variation des QS;
- comparaison des QS calculés aux QS d'autres BV ayant un comportement hydrologique semblable aux BV étudiés.

Il s'agit de trouver des bassins versants ayant des comportements hydrologiques assimilables aux différents bassins à l'étude. Il est question premièrement de trouver des stations hydrométriques installés sur des BV hydrologiquement semblables (superficie, occupation, etc.) aux bassins à

l'étude. Dans un second temps, déterminer les débits spécifiques et enfin les comparer aux débits spécifiques des bassins à l'étude. Les résultats de cette analyse pour les SH des Outardes et de Saint Maurice sont présentés respectivement aux sections 0 et 5.3.2.2.

iii. Analyse des paramètres d'évaporation (APE)

L'APE illustre la variation des taux d'évaporation sur les différents BV, respectivement sur les périodes avant la mise en eau, après la mise en eau et après 2005. Cette analyse a permis de :

- calculer des pourcentages d'évaporation sur les BV du système hydrique étudié;
- analyser leur variation dans le temps (avant et après la mise en eau, après 2005);
- analyser l'impact des superficies des bassins sur la variation de l'évaporation;
- analyser l'impact des plans d'eau sur la variation du taux de l'évaporation.

Les résultats de l'APE pour les SH des Outardes et de Saint Maurice sont présentés respectivement aux sections 0 et 5.3.2.2.

5.2.2 Les séries météorologiques

Les modèles HSAMI et HYDROTEL utilisés pour simuler les apports historiques journaliers utilisent des données météorologiques (neige, pluie, température minimale et maximale) comme des données d'entrée. Afin d'appréhender la qualité des résultats (apports journaliers simulés) que les modèles fourniront. Une analyse de la qualité des séries météorologiques est réalisée.

Les principaux indices climatiques utilisés en partie sont présentés en annexe C. Ces indicateurs sont calculés et analysés pour les séries météorologiques SPAN en comparaison à d'autres séries météorologiques disponibles. L'analyse des données météorologiques se base les différentes méthodes de comparaison qui ont été utilisées pour observer les différences entre les séries météorologiques. Les séries météorologiques analysées proviennent des sources respectives de NLWIS, Ouranos, SPAN et IREQ. La comparaison s'effectue selon les critères statistique (CS), climatologique (CC) et hydrologique (CH).

5.3 Résultats de la validation des données d'entrée

5.3.1 Les séries hydrométriques

5.3.2 Définition des classes de qualité

L'analyse porte sur le traitement et la validation des séries de données hydrométriques historiques selon différentes méthodes envisageables, entre autre: la détection de données aberrantes, la détection des données manquantes et si possible l'imputation des valeurs manquantes, etc. Les méthodes de moyenne, de régression stochastique sont les méthodes d'imputation utilisées.

Le filtrage des séries de données est fait selon le niveau du bruit et l'aspect des données. Les séries de données historiques sont décomposées et analysées selon la tendance, la composante (cyclique et saisonnière) afin de faciliter les traitements. Pour compléter cette analyse, des classes de qualité sont définies. Le Tableau 5.1 présente les classes de qualité et la description élaborée pour chacune.

Tableau 5.1: Définition des Classes de qualité

Classe	Description de la classe
A	Les Bruits présents dans les séries de données sont insignifiants sur la période. Les Séries harmonisées sont bien représentées. Les ruptures de fin de mois sont presque inexistante. Les Apports filtrés sont très Adéquats. bonne cohérence et ajustement des données.
B	Très bonne réduction du bruit dans les séries de données sur la période. Apports harmonisés: Quelques ruptures de fin de mois. Les Apports filtrés se rapprochent mieux des apports calculés et sont adéquats pour évaluer les volumes et pics.
A	Apports moins bruités sur la période. Apports harmonisés: Quelques ruptures de fin de mois indésirables. Les Apports filtrés connaissent une bonne corrélation avec les apports calculés.
D	Apports calculés excessivement bruités sur la période. Les données sont inutilisables. Apports filtrés inutilisables. Apports harmonisés: Rupture de fin de mois indésirables.

5.3.2.1 Système hydrique des Outardes

Les séries de données des BV outardes 02, 03 et 04 ont été analysées en utilisant les différentes classes de qualité définies au tableau ci-dessus.

i. Analyse de la qualité des données

L'analyse des séries de données du SH des Outardes a permis d'élaborer le Tableau 5.2. Le tableau indique la qualité des différentes séries hydrométriques sur les différentes périodes.

Tableau 5.2: Synthèse de qualité des données d'entrée du SH des Outardes

BASSIN	classe de qualité			
	Classe D	Classe C	Classe B	Classe A
Outarde 02		1979-1996	1997-2004	2005-2014
Outarde 03	1969-1978	1979-1996	1997-2004	2005-2014
Outarde 04		1969-1981	1982-1994	1995-2014

L'analyse des données du Tableau 5.2 montre que sur l'ensemble des trois bassins, les données d'apports connaissent une très bonne cohérence à partir de l'année 2005. Le BV outarde 04 présente une bonne adéquation entre les années 1995 et 2014. Les données sont inutilisables pour les bassins outarde 02 et 03 sur la période de 1979 à 1996.

ii. Analyse des débits spécifiques

L'analyse des débits spécifiques du SH des Outardes est réalisée. Les variations des débits spécifiques des BV du SH des Outardes sont représentées respectivement aux Figure 5.1, Figure5.2

• BV Outarde 02:

La Figure 5.1 montre que les débits spécifiques conservent la même tendance avant et après la mise en eau, précisément de 1950 à 1986. Cette tendance connaît une oscillation de valeur très modeste. Sur la période de 1986 à 1999, une chute de l'intensité du débit spécifique est enregistrée. Depuis les années 1998, le débit spécifique a connu une tendance à la stabilité pour retrouver les ratios des années avant la mise en eau.

- **BV Outarde 03:**

La figure 5.1 montre que les débits spécifiques des BV Outarde 03 et Outarde 02 conservent la même tendance. Cet état de fait illustre l'impact direct du BV Outarde 03 sur le BV Outarde 02.

- **BV outarde 04:**

La Figure 5.2 montre une oscillation de la variation du débit spécifique très significative. En général, la variation du débit spécifique garde la même tendance. Le BV Outarde 04 n'influence pas directement les bassins outardes 02 et 03 en aval. On ne note aucun changement véritable entre les périodes d'avant et d'après la mise en eau, même après l'année 2005.

iii. Analyse des paramètres d'évaporation

Le Tableau 5.3 présente la synthèse des taux d'évaporation sur les différents bassins du SH des Outardes avant et après la mise en eau des différents réservoirs.

Le Tableau 5.4 présente la synthèse des précipitations liquides et solides, des apports générés associés au taux d'évaporation pour chacun des bassins versants du SH des Outardes.

L'analyse des pourcentages d'évaporation obtenus en fonction des données disponibles ne permet pas d'évaluer l'impact du réservoir sur le taux d'évaporation. Les taux d'évaporation se situent aux environs des 30%.

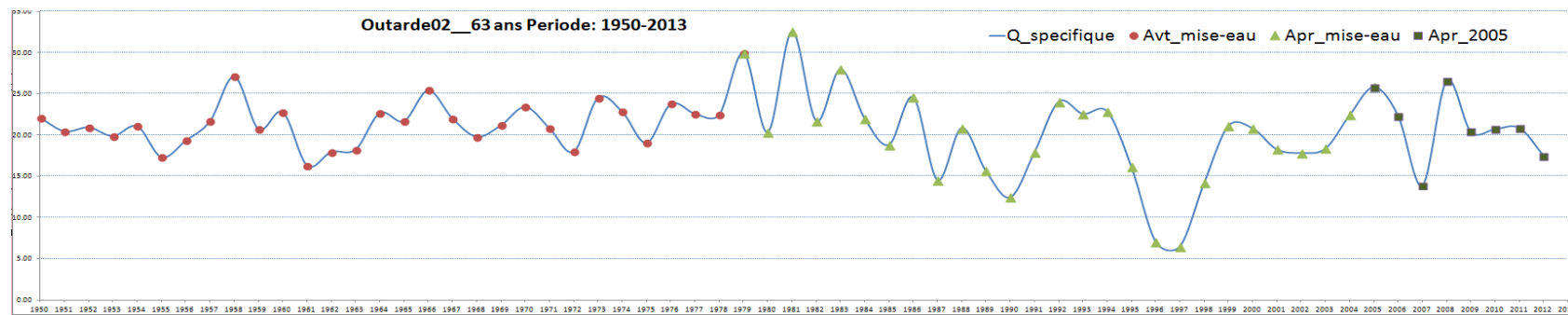


Figure 5.1: Variabilité des débits spécifiques – BV Outarde 02_SH des Outardes

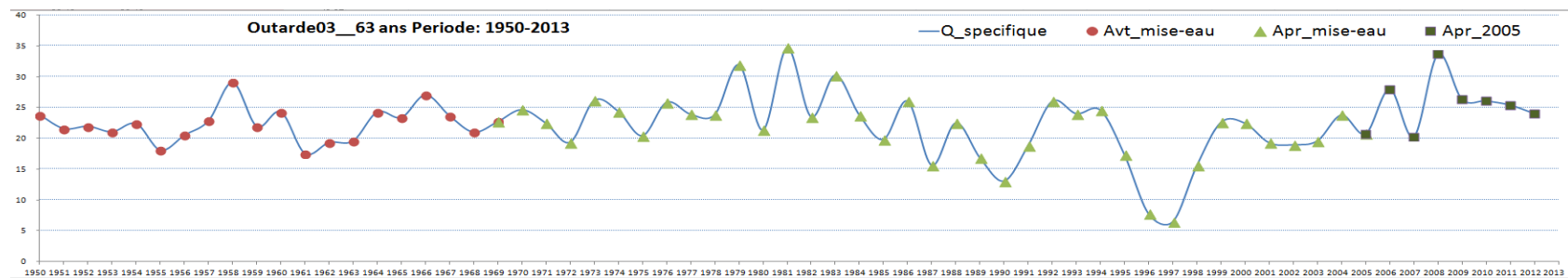


Figure 5.2: Variabilité des débits spécifiques – BV Outarde 03_SH des Outardes

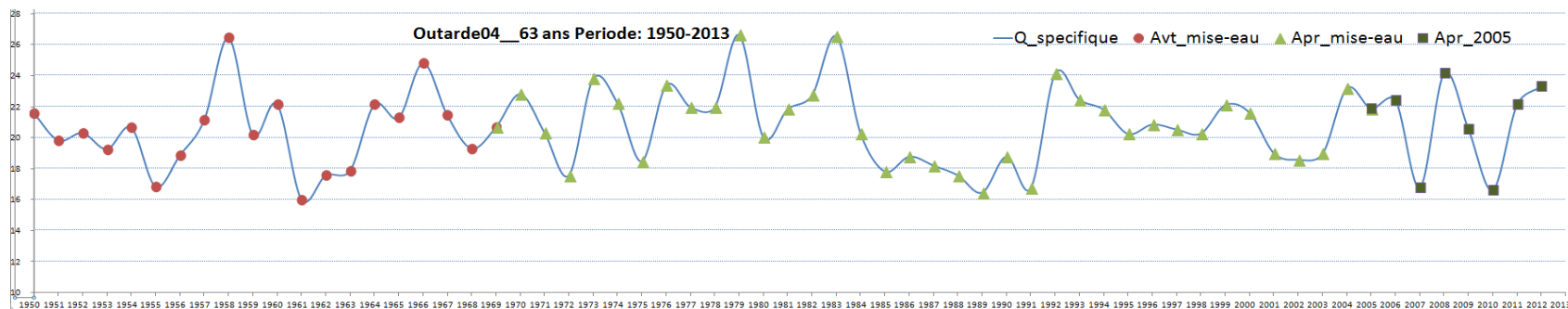


Figure 5.3: Variabilité des débits spécifiques – BV Outarde 04_SH des Outardes

Tableau 5.3: Synthèse des taux d'évaporation _SH des Outardes

		Outarde 4	Outarde 3	Outarde 2	Moyenne
		1969	1969	1978	
% Évaporation	Date de mise en eau	1969	1969	1978	
	Depuis la mise en eau	29%	25%	36%	29%
	Avant la mise en haut	31%	29%	32%	32%
	Toutes les années	29%	26%	34%	29%
Nombre d'années	Depuis 2005	23%	16%	35%	26%
Nombre d'années	Depuis la mise en eau	42	42	33	36
	Avant la mise en eau	19	19	28	25

Tableau 5.4: Synthèse des précipitations, apports et évaporation _SH des Outardes

		Outarde 4	Outarde 3	Outarde 2	Moyenne
		1969	1969	1978	
Depuis la mise en eau	Date de mise en eau	1969	1969	1978	
	Précipitation (mm)/an	0.92	0.93	0.99	0.94
	Apports (mm)/an	0.65	0.70	0.63	0.67
	% Évaporation	29%	25%	36%	29%
Avant la mise en eau	Précipitation (mm)/an	0.93	0.99	0.99	0.98
	Apports (mm)/an	0.64	0.70	0.67	0.66
	% Évaporation	31%	29%	32%	32%
Toutes les années	Précipitation (mm)/an	0.92	0.95	0.99	0.95
	Apports (mm)/an	0.65	0.70	0.65	0.68
	% Évaporation	29%	26%	34%	29%
Depuis 2005	Précipitation (mm)/an	0.84	0.97	1.04	0.96
	Apports (mm)/an	0.64	0.82	0.68	0.70
	% Évaporation	23%	16%	35%	26%
Nombre d'années	Depuis la mise en eau	42	42	33	36
	Avant la mise en eau	19	19	28	25

5.3.2.2 Système hydrique de Saint-Maurice

i. Analyse de la qualité des données

Le Tableau 5.5 présente la synthèse de la qualité des données hydrométriques disponibles pour l'étude du SH Saint-Maurice. L'analyse des résultats du Tableau 5.5 montre que les BV de Beaumont, de la Trenché et de la Tuque possèdent des séries de bonne qualité sur les périodes respectives de 2003-2014 et 2001-2014. L'ensemble des bassins versants présente des données de qualité moyenne avant et après la mise en eau.

Tableau 5.5: Synthèse de qualité des données d'entrée du SH de Saint-Maurice

Bassin Versant	Classe de qualité			
	Classe D	Classe C	Classe B	Classe A
BEAUMONT	1983-1990		1997-2004 & 1960-1982	2003-2014
GOUIN	1979-1993	1962-1978	1994-1998 & 1999-2012	
GRAND-MERE	1962-1987	1988-1999	2000-2012	
LA TUQUE		1985-1986	1987-2000 & 1960-1984	2001-2014
MANOUANE A-B-C	1960-1984	1985-1996	1997-2012	
RAPIDE-BLANC A C & GOUIN		1979-2001	1962-1978 & 2002-2012	
SHAWINIGAN & LA GABELLE	1962-2004	2005-2012		
TAUREAU	1976-1998	1962-1975 1999-2006	2007-2012	
TRENCHÉ	1983-1990		1997-2004 & 1960-1982	2003-2014

ii. Analyse des débits spécifiques

Les résultats de calcul des débits spécifiques sur les différents bassins du SH de Saint-Maurice sont présentés. Les variations des débits spécifiques sont illustrées sur les Figure 5.4, Figure 5.5, Figure 5.6 , Figure 5.7, Figure 5.8 et Figure 5.9. Les figures présentent la variation des débits spécifiques dans le temps. L'analyse porte sur les variations moyennes avant et après la mise en eau des différents réservoirs.

• BV Grand-Mère

L'analyse de La Figure 5.4 montre que la variation du débit spécifique conserve la même tendance avant la mise en eau et juste après la mise en eau du réservoir. Cette tendance connaît une grande instabilité après cette période. Après 2005, le débit spécifique à une tendance à la stabilité pour retrouver les ratios des années avant la mise en eau.

- **BV Manouane A-B-C**

La Figure 5.5 illustre une instabilité globale du débit spécifique avant l'année 2005. Néanmoins, les débits spécifiques conservent une valeur moyenne après l'année 1975.

- **BV Beaumont**

La variation du débit spécifique est moins significative dans le temps comme illustrée sur Figure 5.6. Cette variation garde une tendance autour d'une valeur moyenne d'environ $15\text{m}^3/\text{s/ha}$. La mise en eau du réservoir n'a pas aucune influence significative sur la variation du débit spécifique. Néanmoins des valeurs élevées sont enregistrées vers les années 1972-1974 et après 2005.

- **BV Rapide-blanc**

La Figure 5.7 montre que la variation du débit spécifique conserve la même tendance. Des valeurs extrêmes sont enregistrées en 1974 et 2006. La variation de la courbe illustre l'augmentation de la moyenne des débits spécifiques après la mise en eau.

- **BV La Tuque**

La Figure 5.8 montre une variation importante du débit spécifique dans le temps. La tendance de la valeur moyenne n'est pas observée. Des valeurs extrêmes maximales sont enregistrées respectivement en 1972, 1996 et 2008.

- **BV Gouin**

La Figure 5.9 montre une variation importante du débit spécifique dans le temps. Des valeurs extrêmes maximales et minimales sont enregistrées respectivement en 1973 et 1995. On observe une tendance de la valeur moyenne du débit spécifique à se stabiliser avant l'année 1995. Après l'année 1995, une grande oscillation du débit spécifique est observée.

iii. Analyse des paramètres d'évaporation

Le Tableau 5.6 présente la synthèse des taux d'évaporation sur les dix (10) BV du SH de Saint-Maurice sur les périodes avant et après la mise en eau des réservoirs. La synthèse des précipitations liquides et solides, des apports générés associés au taux d'évaporation pour chacun des bassins versants du SH de Saint-Maurice est présentée au Tableau 5.7.

L'analyse des pourcentages d'évaporation obtenus en fonction des données disponibles ne permet pas de qualifier l'impact du réservoir sur le taux d'évaporation. Le taux moyen d'évaporation sur le SH de Saint-Maurice se situe aux environs des 44%.

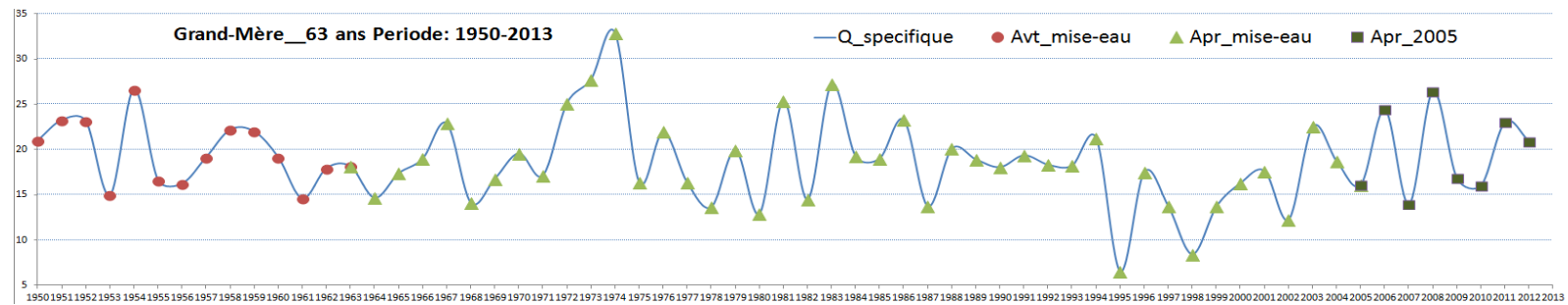


Figure 5.4: Variabilité des débits spécifiques _BV Grand-Mère_ SH de Saint-Maurice

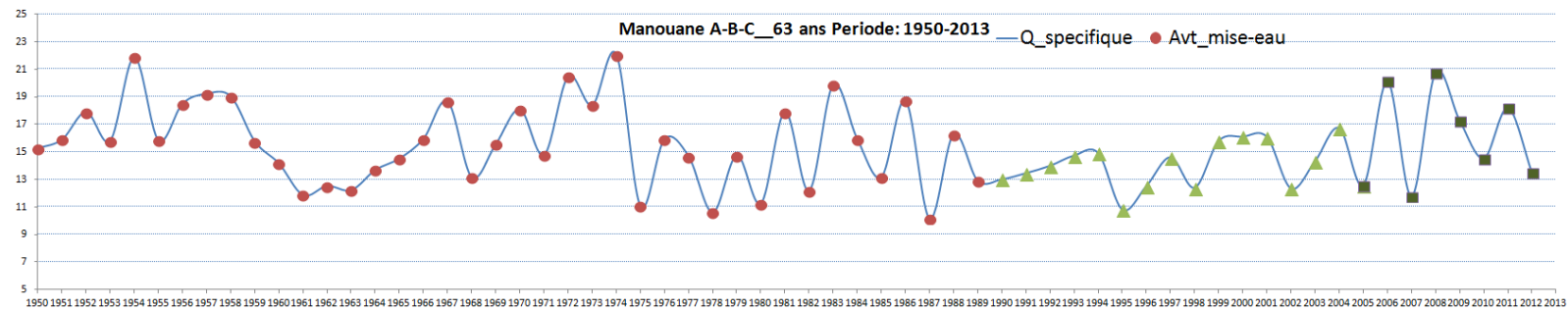


Figure 5.5: Variabilité des débits spécifiques _BV Manouane A-B-C_ SH de Saint-Maurice

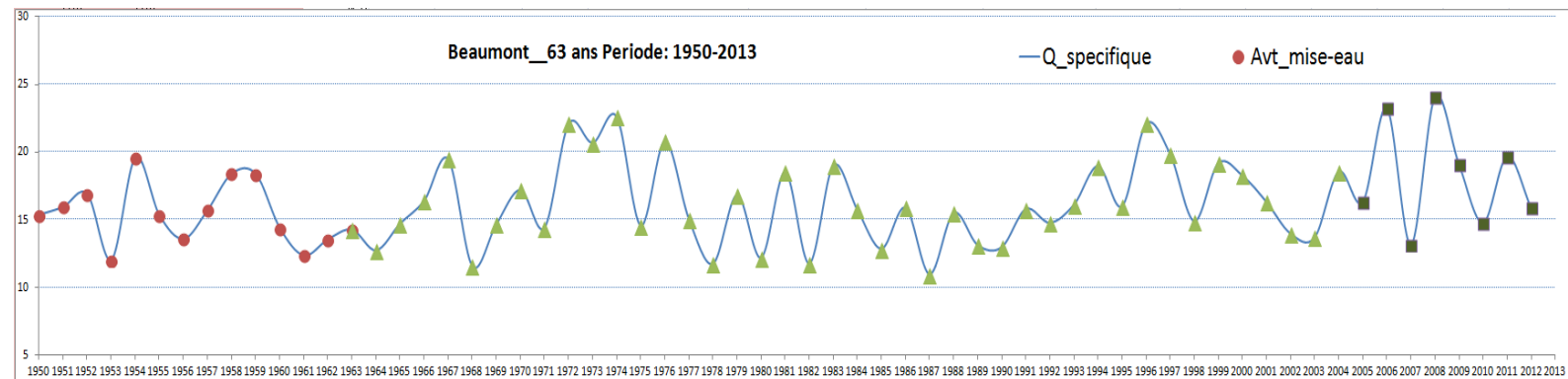


Figure 5.6: Variabilité des débits spécifiques _BV Beaumont_ SH de Saint-Maurice

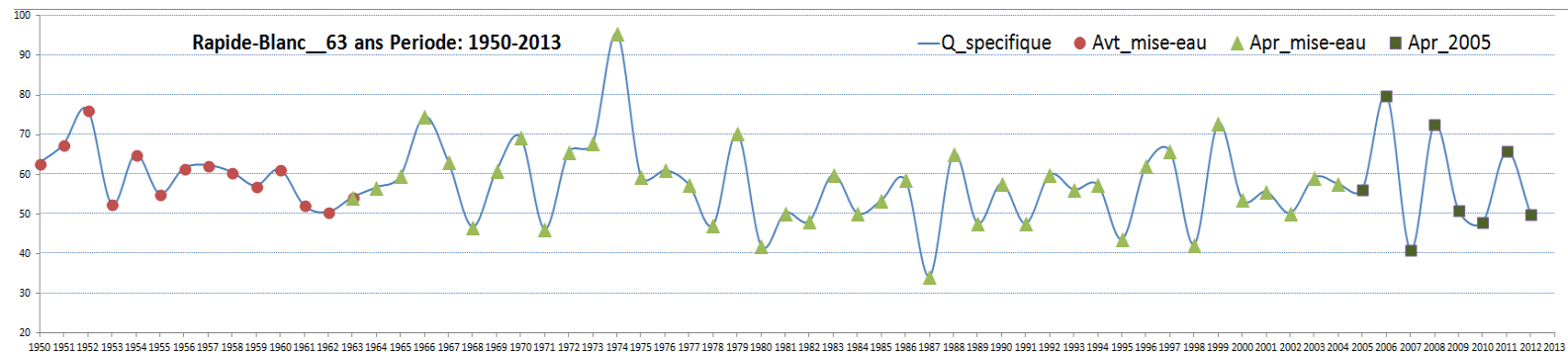


Figure 5.7: Variabilité des débits spécifiques _ BV Rapide-blanc_ SH de Saint-Maurice

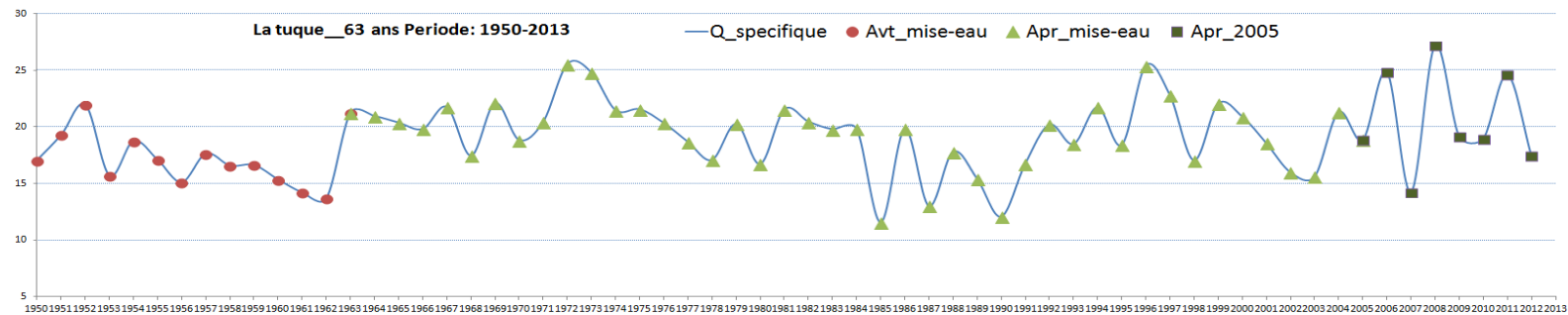


Figure 5.8: Variabilité des débits spécifiques _BV La tuque_ SH de Saint-Maurice

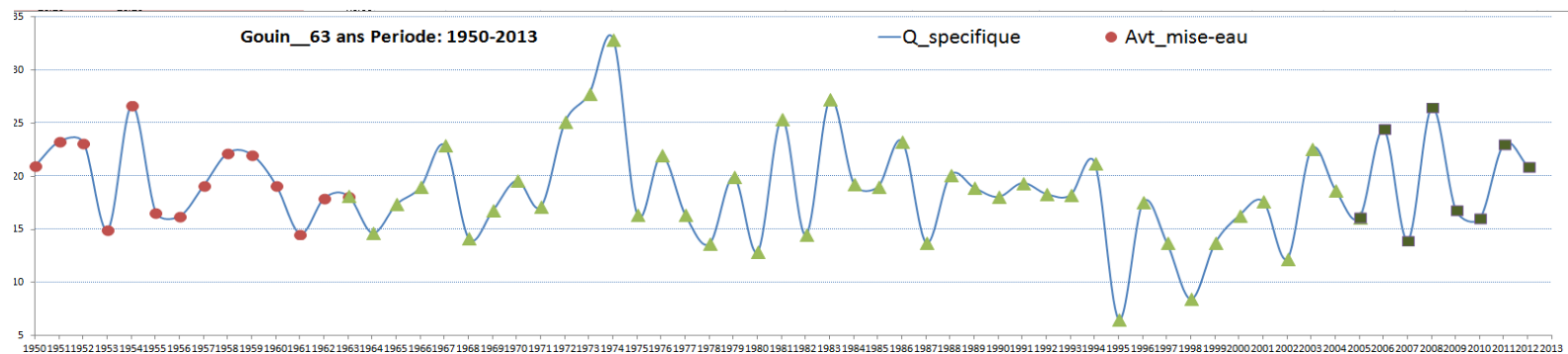


Figure 5.9: Variabilité des débits spécifiques _BV Gouin_ SH de Saint-Maurice

Tableau 5.6: Synthèse des taux d'évaporation _SH de Saint-Maurice

		Trenche	La Tuque	Rapide-Blanc	Gouin	Manouane A-B-C	Beaumont	Grand-Mère	Taureau	Shawinigan et la Gabelle	Moyenne
	Date de mise en eau	1963	1963	1963	-	1989	1963	1963	-	2004	
% Évaporation	Depuis la mise en eau	39%	37%	46%	-	51%	45%	48%	-	29%	44%
	Avant la mise en haut	45%	46%	45%	-	50%	50%	46%	-	49%	47%
	Toutes les années	40%	39%	45%	42%	51%	46%	47%	40%	47%	44%
	Depuis 2005	38%	38%	44%	41%	49%	40%	51%	49%	27%	43%
Nombre d'années	Depuis la mise en eau	48	48	48	-	22	48	48	-	7	44
	Avant la mise en eau	13	13	13	-	39	13	13	-	54	17

Tableau 5.7: Synthèse des précipitations, apports et évaporation_ SH de Saint-Maurice

		Trenche	La Tuque	Rapide-Blanc	Gouin	Manouane A-B-C	Beaumont	Grand-Mère	Taureau	Shawinigan et la Gabelle	Moyenne
	Date de mise en eau	1963	1963	1963	-	1989	1963	1963	-	2004	
Depuis la mise en eau	Précipitation (mm)/an	0.99	0.99	0.96	-	0.95	0.94	0.95	-	1.09	0.96
	Apports (mm)/an	0.60	0.62	0.52	-	0.46	0.52	0.50	-	0.78	0.54
	% Évaporation	39%	37%	46%	-	51%	45%	48%	-	29%	44%
Avant la mise en eau	Précipitation (mm)/an	0.99	0.98	0.99	-	1.00	0.98	0.98	-	1.02	0.99
	Apports (mm)/an	0.54	0.53	0.55	-	0.50	0.49	0.53	-	0.52	0.52
	% Évaporation	45%	46%	45%	-	50%	50%	46%	-	49%	47%
Toutes les années	Précipitation (mm)/an	0.99	0.99	0.97	0.98	0.98	0.95	0.96	0.95	1.03	0.97
	Apports (mm)/an	0.59	0.60	0.53	0.58	0.48	0.51	0.50	0.57	0.55	0.54
	% Évaporation	40%	39%	45%	42%	51%	46%	47%	40%	47%	44%
Depuis 2005	Précipitation (mm)/an	0.94	1.05	0.95	0.93	1.00	0.98	1.03	1.08	1.12	0.98
	Apports (mm)/an	0.58	0.65	0.53	0.55	0.51	0.58	0.51	0.55	0.82	0.56
	% Évaporation	38%	38%	44%	41%	49%	40%	51%	49%	27%	43%
Nombre d'années	Depuis la mise en eau	48	48	48	-	22	48	48	-	7	44
	Avant la mise en eau	13	13	13	-	39	13	13	-	54	17

5.3.3 Les séries météorologiques

Cette analyse de la validation des séries météorologiques a été faite principalement à l'interne par les services d'HQ. Les résultats de l'analyse ont été considérés comme des hypothèses de base pour la validation des séries météorologiques utilisées dans la présente étude. En effet, suite à l'analyse faite les séries météorologiques ont été déclarées de mauvaise qualité.

i. contexte de la validation des séries météorologiques

L'analyse de la qualité des données météorologiques a été faite pour répondre à l'objectif d'utiliser des séries météorologiques dans le modèle hydrologique HSAMI. HSAMI devrait être utilisé pour reconstruire les apports historiques journaliers. Les séries de données météorologiques NLWIS, SPAN, Ouranos et IREQ ont été analysées dans le cadre de cette étude. Les BV jaugés ont été choisis. Les rivières et leurs superficies respectives sont présentées au Tableau 5.8

Tableau 5.8: Rivières Choies avec leur superficie

Rivière analysées	Superficie (km²)
Croche	1550
Eastmain GP	21352
Eaton	646
Kinojevis	2574
Moisie	18990
Southnation	3758

Les méthodes classiques de comparaison sont insuffisantes pour comparer des séries météorologiques. Les critères présentés à la section 5.2.2 ont été utilisés pour cette analyse.

ii. Comparaison statistique

La comparaison statistique a été réalisée. La comparaison s'est basée respectivement sur les paramètres statistiques généraux (moyenne, maximum et minimum), l'analyse des corrélations croisées et la classification hiérarchique des séries analysées. Pour l'analyse de la corrélation croisée, le test de Stationnarité et le test de corrélation croisée ont été réalisés. La classification hiérarchique a été réalisée avec le logiciel hclust. L'analyse des résultats montre que :

- les valeurs moyennes de précipitation de la série SPAN sont légèrement plus élevées,
- les séries de précipitations sont globalement stationnaires, bien que le test de stationnarité ait échoué à quelques endroits,

- la variation des valeurs de températures de la série SPAN se situe dans la même tendance que celle des autres séries météorologiques,
- les séries de température maximum et minimum sont globalement stationnaires,
- les précipitations de la série SPAN diffèrent légèrement des précipitations des autres séries,
- selon la classification hiérarchique, les précipitations de la série SPAN diffèrent largement des autres séries sur les rivières Southnation et Eaton. Ces précipitations diffèrent modérément des autres séries pour la rivière Kinojevis. Pour les autres rivières, toutes les séries météorologiques ont des valeurs très proches.

iii. Comparaison climatologique

Le logiciel RClimDex développé par le "Climate Reseach Division d'Environnment Canada" est utilisé pour analyser les indices climatiques des différentes séries (Peterson et al, 2001). Ces indices climatiques sont résumés et présentés en Annexe C. Les 6 indices climatiques (PRCPTOT, SDII, ID0, FD0, SU25 et R99) sont analysés. L'analyse des résultats montre que:

- pour les indices (ID0, FD0 et SU25) reliés à la température, les valeurs obtenues sont plus comparables pour toutes les séries météorologiques,
- pour les indices (PRCPTOT, SDII et R99) reliés aux précipitations, les séries SPAN s'écarte des trois autres.

iv. Comparaison hydrologique

Le modèle hydrologique HSAMI a été utilisé pour simuler les débits pour chacune des séries météorologiques. Les débits observés et simulés ont été par la suite comparés à l'aide du critère de NSE modifié. L'analyse des résultats a montré que :

- les valeurs de NSE de la série SPAN sont inférieures aux NSE des autres séries,
- Les débits simulés par la série SPAN semblent s'éloigner des autres séries météorologiques,
- les différentes méthodes d'interpolation des séries donnent sensiblement les mêmes résultats.

v. Synthèse

La conclusion de la validation des séries météorologiques à l'interne invalide la qualité des séries SPAN. Elle propose la mise en place d'une nouvelle série météorologique de meilleure qualité. Ces séries nouvelles proposées permettront d'avoir des meilleurs résultats lors de la modélisation hydrologique dans le cadre de l'harmonisation des ANR. Dans le cadre de notre étude, les données météorologiques ne sont toujours pas améliorées.

CHAPITRE 6 VALIDATION ET CALIBRATION DES MODÈLES

La validation et la calibration permettent d'optimiser l'utilisation des modèles hydrologiques HYDROTEL et HSAMI. La calibration conséquente passe par les objectifs spécifiques suivants:

- i. définir l'optimiseur optimal et des fonctions objectifs optimaux;
- ii. définir le nombre maximal d'évaluation, et la taille de la population optimale de calibration en tenant compte de la qualité des paramètres obtenus versus les temps de calibration utiles;
- iii. définir les seuils d'acceptabilité et de sauvegarde des paramètres optimaux.

6.1 La problématique de la calibration des modèles hydrologiques

La validation et le calage d'un modèle représente une étape importante et critique dans le processus de modélisation. Cette étape permet de déterminer pour chaque modèle et pour chaque site à l'étude, les paramètres optimaux nécessaires à la simulation des données hydrométriques journalières. Il s'agit en clair de raffiner les deux modèles hydrologiques utilisés et de les rendre capables de simuler le comportement hydrologique de la zone d'étude.

La calibration réussie, garantie en partie la représentation des conditions hydrologiques de façon adéquate. Cette démarche permet de choisir l'optimiseur optimal et des fonctions objectives optimales. Le nombre maximal d'évaluations, et la taille de la population sont également définis. Les seuils d'acceptabilité et de sauvegarde des paramètres optimaux seront validés.

6.2 La détermination des fonctions objectives et de l'optimiseur

i. Le critère Kling-Gupta KGE

Le KGE développé par Gupta, Kling, Yilmaz et Martinez (2009), est utilisé pour prendre en compte le critère de distance euclidienne (DE) entre les valeurs prises par les trois composantes et leurs valeurs optimales. Le KGE calculé entre les hydrogrammes de la simulation et de l'observation, introduit un critère qui est la différence entre 1 et la distance euclidienne.

L'objectif est d'atteindre les valeurs optimales des composantes, la distance euclidienne doit tendre vers zéro et on cherche ainsi à maximiser le KGE.

Équation 6.1

$$\text{KGE} = 1 - \text{DE avec : } \text{DE} = \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$$

r : le coefficient de corrélation de Pearson entre la simulation et l'observation

$\alpha = \sigma_{\text{simulé}} / \sigma_{\text{observé}}$: le coefficient qui caractérise la variabilité de la simulation par rapport à l'observation

$\beta = \mu_{\text{simulé}} / \mu_{\text{observé}}$: le rapport entre la moyenne de la simulation et la moyenne de l'observation

ii. Le critère de Nash-Sutcliffe

Le Nash (1970) permet d'appréhender la variance des débits observés. Les débits simulés par le modèle seront meilleurs quand le critère NSE se rapproche de la valeur 1. Par comparaison à d'autres critères, le NSE a l'avantage d'être facilement interprétable.

Équation 6.2

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{\text{observé } i} - Q_{\text{simulé } i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{\text{observé } i} - \overline{Q_{\text{observé}}})^2}$$

$Q_{\text{observé } i}$ = Débit journalier observé

$Q_{\text{simulé } i}$ = Débit journalier simulé

N = nombre de jour

i = numéro de la journée concernée

$\overline{Q_{\text{observé}}}$ = Moyenne de l'observation

iii. Programme Matlab de calibration

Des programmes réalisés avec le langage Matlab sont élaborés et utilisés pour la calibration automatique des modèles hydrologiques HSAMI et HYDROTEL.

Un calage automatique faisant appel à un optimisateur tel que le SCE-UA (Duan, Sorooshian, et Gupta, 1994) est utilisé pour la calibration du modèle HSAMI. Il permet d'obtenir une multitude de combinaisons de paramètres tel que décrit par Beven (2006).

6.3 Résultat de la calibration

6.3.1 Calibration du modèle HSAMI

Les résultats de la calibration du modèle HSAMI sont présentés en annexe. La calibration du BV Beaumont du SH de Saint-Maurice est présentée à la Figure 6.1 et à la Figure 6.2. Les résultats de la calibration de ce bassin sont spécifiquement présentés ici car ce bassin est utilisé à titre d'exemple dans les résultats présentés. La calibration est faite sur la période (2006-2013) et celle de la validation sur la période (1980-1987). Le Tableau 6.1 présente la synthèse des valeurs de NSE pour la calibration du modèle HSAMI sur les différents bassins du SH de Saint-Maurice.

Tableau 6.1: Synthèse des valeurs NSE et KGE _ Calibration HSAMI_ SH de Saint-Maurice

Bassin	Calibration		Validation	
	NSE	KGE	NSE	KGE
Beaumont	0.8617	0.8733	0.5685	0.5544
Gouin	0.8184	0.8597	0.0572	0.0720
Grand-Mère	0.5567	0.6869	0.62	0.0628
Rapide-Blanc a C et Gouin	0.9321	0.9274	0.8139	0.7103
La Tuque	0.8788	0.9004	0.7937	0.4728
Manouane A-B-C	0.8631	0.8592	0.2822	0.3448
Taureau	0.8920	0.8616	0.5739	0.4232
Shawinigan et La Gabelle	0.6877	0.7250	Nan	Nan
Trenche	0.8935	0.9046	0.7431	0.6917

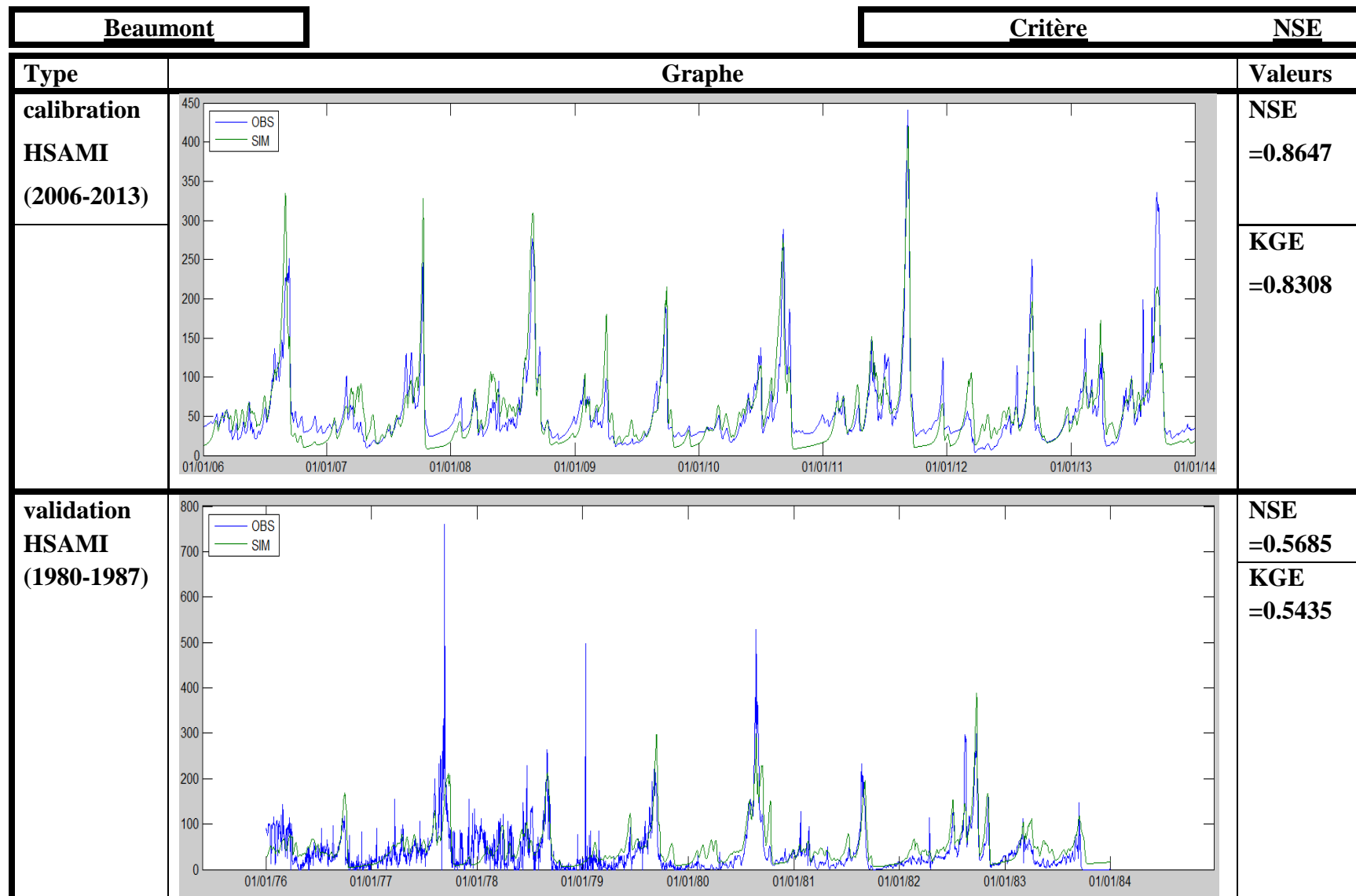


Figure 6.1: Calibration HSAMI _ Critère NSE_ BV Beaumont _SH de Saint-Maurice

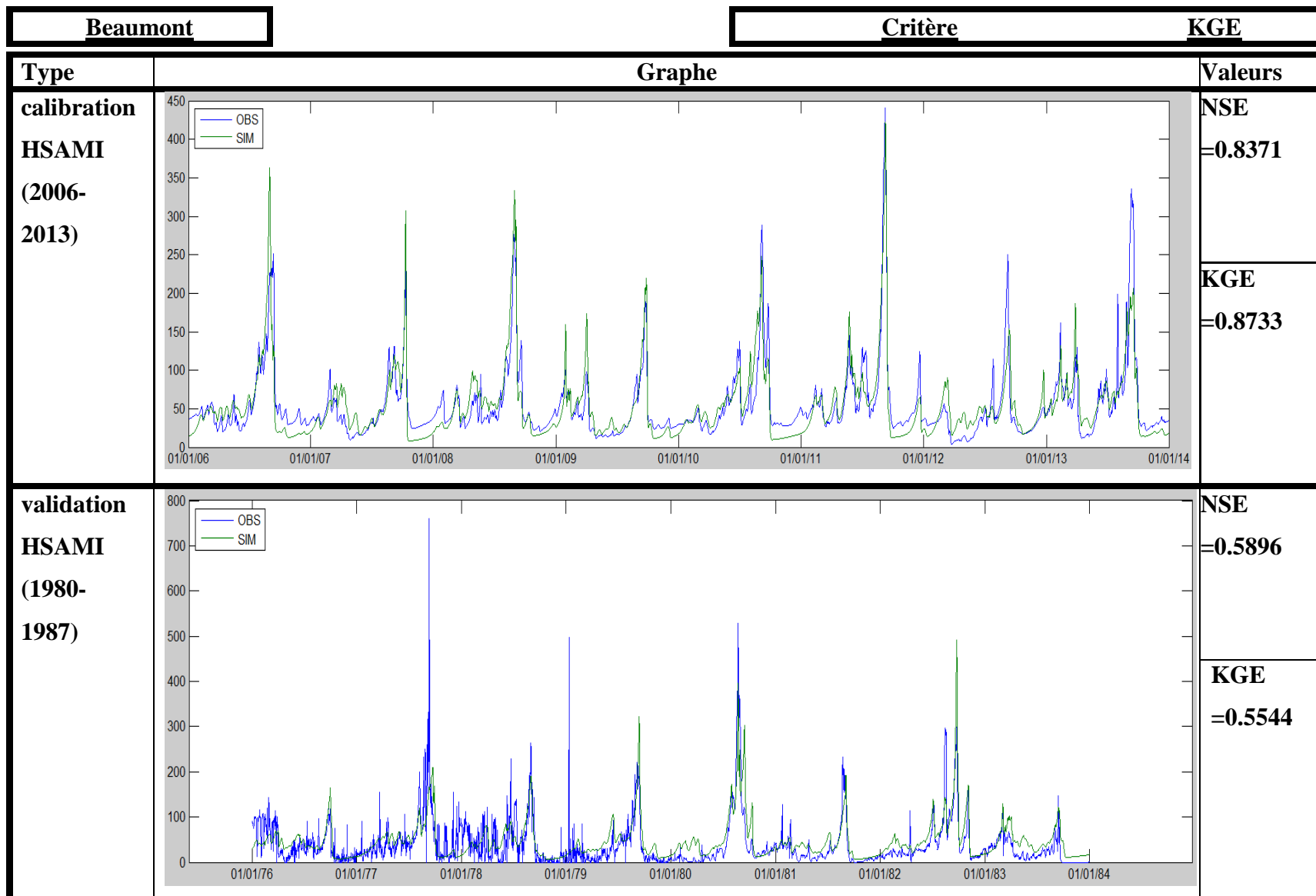


Figure 6.2: Calibration HSAMI_ Critère NSE_ BV Beaumont _SH de Saint-Maurice

6.4 Calibration du modèle HYDROTEL

Les résultats de la calibration du modèle HSAMI sont présentés en annexe. La calibration du BV Beaumont du SH de Saint-Maurice est présentée à la Figure 6.3. Le Tableau 6.2 présente la synthèse des valeurs de NSE pour la calibration du modèle HYDROTEL pour quelque BV du SH de Saint-Maurice.

Tableau 6.2: Synthèse des valeurs NSE_ Calibration HYDROTEL

Bassin	Calibration/Validation
	NSE
<u>Beaumont</u>	0.75
<u>Vermillon</u>	0.79
<u>Rapide-Blanc a C et Gouin</u>	0.87
<u>La Tuque</u>	0.69
<u>Trenche</u>	0.84
<u>Croche</u>	0.73

La Figure 6.3 présente les différents éléments pris en compte dans la calibration. La variation dans le temps des débits journaliers simulés est présentée. Sous l'effet de l'évaporation due à la variation de la température, le bilan de l'écoulement vertical soumis aux précipitations solides et liquides est simulé.

Des débits journaliers sont générés de cet écoulement. La valeur de NSE obtenue est 0,75 pour la calibration du BV de Beaumont du SH de Saint-Maurice.

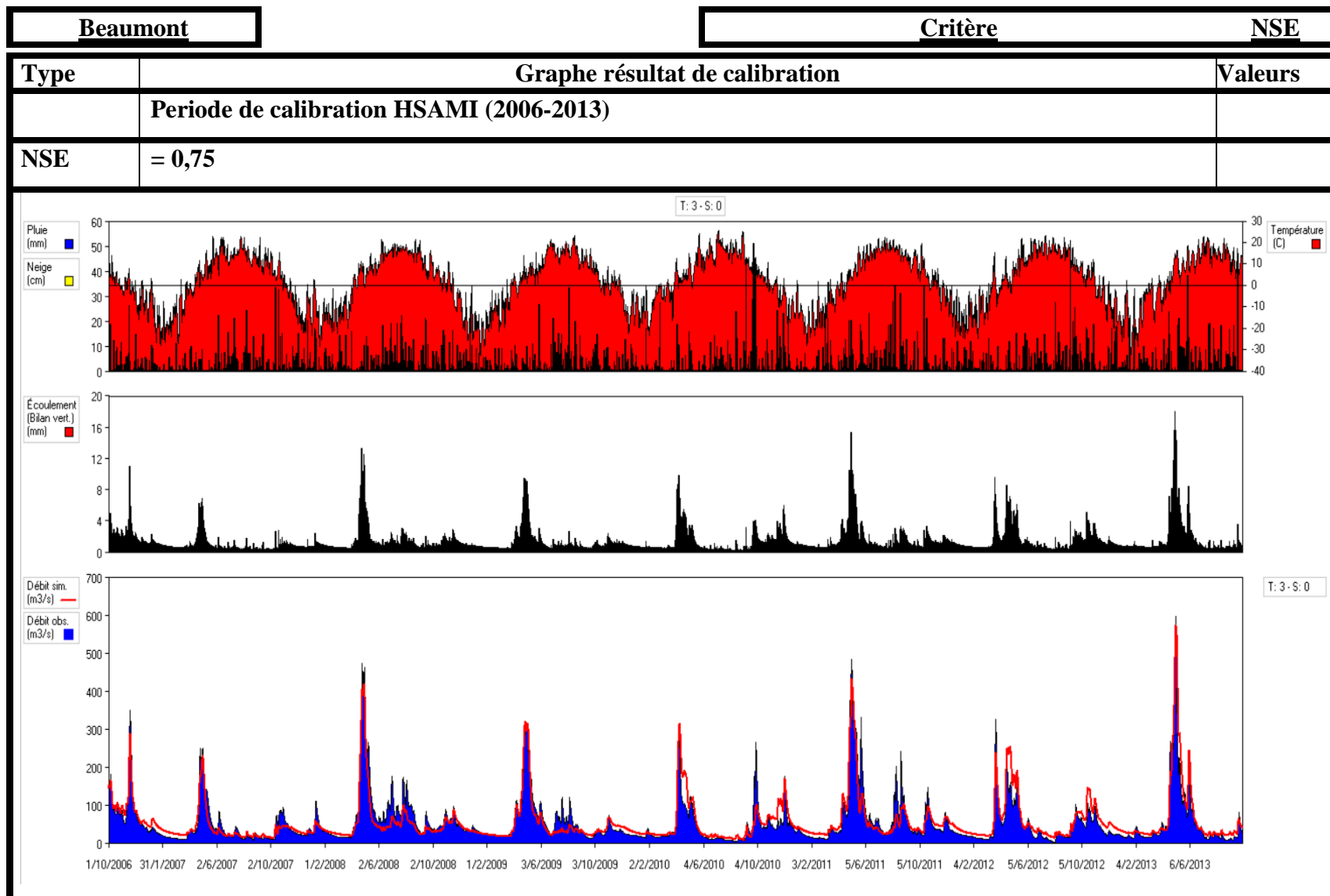


Figure 6.3: Calibration HYDROTEL du BV Beaumont (SH de Saint-Maurice)

6.5 Résultat et discussion de la calibration

En se basant sur les propositions de HQ provenant des études antérieures et des habitudes de pratiques chez HQ, les paramètres de calibration ont été définis et validés. Sur la base des paramètres de calibration obtenus, les paramètres optimaux des différents modèles ont été déterminés pour les bassins versants du système hydrique de Saint-Maurice.

La Tableau 6.3 présente les valeurs NSE acquise sur chacun des modèles pour la calibration. Les valeurs de NSE sont présentées et analysés pour les bassins ayant les données disponibles pour la calibration et la validation des modèles.

Tableau 6.3: Synthèse des NSE HYDROTEL versus NSE HSAMI

Bassin	HYDROTEL	HSAMI
	NSE	NSE
Beaumont	0.75	0.5685
Rapide-Blanc à C et Gouin	0.87	0.8139
La Tuque	0.69	0.7937
Trenche	0.84	0.7431

L'analyse des résultats du Tableau 6.3 montre qu'à l'exception du BV La tuque, toutes les valeurs de NSE HYDROTEL sont supérieures aux NSE HSAMI.

CHAPITRE 7 CHOIX DE LA MÉTHODE ADÉQUATE

Une étude comparative des hydrogrammes simulés respectivement par les modèles HSAMI et HYDROTEL, est faite à la suite de la validation des séries simulées. Les indicateurs de qualité définis sont utilisés pour faire la comparaison entre les deux modèles.

7.1 Détermination des indicateurs de choix

Les indicateurs de choix sont définis en fonction des aspects techniques et coûts d'opération présentés ci-dessous:

7.1.1 Aspect Technique

L'aspect quantitatif a son importance au niveau de la destination des débits simulés (utilisation des résultats). Toutefois son estimation demeure assez classique. Mais la prise en compte de son impact sur le choix de la méthode dépend de HQ. En effet, le niveau de satisfaction liée à la qualité des résultats varie d'une compagnie à l'autre. Cet aspect met l'accent sur la qualité des données simulées. La capacité des données simulées à se rapprocher le plus des valeurs enregistrées et surtout d'être représentatif du comportement hydrologique des BV étudiés. En plus des valeurs de NSE calculées, les indicateurs suivants sont analysés:

i. Rapports des débits de pointe

Le rapport des débits de pointe simulé pour chacun des modèles par rapport aux valeurs des débits de pointe de la série harmonisée est analysé, en utilisant l'Équation 7.1.

Équation 7.1

$$RQp(\%) = 100 * \left(1 - \frac{Q_{pte \text{ simulé}}}{Q_{pte \text{ observé}}}\right) \text{ avec}$$

RQp= Rapport des débits de pointe

Q_{pte simulé}= débit de pointe simulé ou calculé

Q_{pte observé}= débit de pointe observé ou mesuré

ii. Erreur relative ER

La valeur de l'erreur relative est calculée sur la base mensuelle, saisonnière et annuelle pour les débits simulés par les différents modèles par rapport aux débits journaliers harmonisés, en utilisant l'Équation 7.2.

Équation 7.2

$$E(\%) = 100 * \left(\frac{1}{N}\right) * \sum_{k=1}^N \frac{Qk \text{ Observé} - Qk \text{ Simulé}}{Qk \text{ Observé}} \quad \text{avec}$$

E(%)= Erreur relative

Qk Simulé= débit simulé ou calculé

Qk Observé= débit observé ou mesuré

N= nombre d'observation

iii. Estimation des volumes

Le rapport des volumes est calculé sur la base mensuelle, saisonnière et annuelle pour les débits simulés pour les différents modèles par rapport aux débits observés harmonisés, en utilisant l'Équation 7.3.

Équation 7.3

$$Rv(\%) = 100 * \left(1 - \frac{\sum_{k=1}^N Qk \text{ simulé}}{\sum_{k=1}^N Qk \text{ observé}}\right) \quad \text{avec}$$

Rv(%)= Rapport des volumes

Qk Simulé= débit simulé ou calculé

Qk Observé= débit observé ou mesuré

N= nombre d'observation

7.1.2 Aspect coûts d'opération

L'aspect coûts d'opération fait référence à un ensemble de quatre coûts principaux. L'importance de l'aspect coût d'opération varie notamment en fonction de la capacité de la compagnie à conduire les activités liées à ces différents coûts. En effet, en fonction de la capacité technologique et financière de la compagnie HQ, les indicateurs suivants sont analysés:

i. Coûts d'acquisition des modèles

Il est question ici de considérer globalement les coûts liés à l'acquisition des différents modèles.

ii. Coûts d'acquisition des données d'entrée

Les coûts d'acquisition des données pris en compte sont les suivantes :

- Les données d'entrée à utiliser pour simuler les différents modèles et leur traitement pour les adapter aux paramètres d'entrée des modèles;
- Les données d'entrée à utiliser pour calibrer les différents modèles.

iii. Coûts liés à la calibration et à la simulation des modèles

Les coûts suivants sont considérés :

- Coûts liés aux matériels et aux logiciels nécessaires pour la calibration et la simulation;
- La main d'œuvre nécessaire et le temps de calcul estimé en coût direct;
- Coûts liés à la mise à jour des modèles, de la formation de la main d'œuvre, etc.

Les aspects économiques identiques (même valeur) applicables aux deux modèles seront négligés dans l'analyse. Seuls les éléments capables d'influencer l'étude économique comparative sont pris en compte. Les différents coûts d'opération engendrés par l'utilisation des différents modèles sont évalués de façon globale.

7.2 Étude comparative des deux modèles

7.2.1 Méthodologie utilisée

En se basant sur la littérature, il est démontré que la méthode d'aide à la prise de décision AHP (Analytic Hierarchy Process) est mieux indiquée pour mener une analyse qualitative (Dewey, et & Rogers, 2012). La méthode AHP développée par Saaty (1971), fait partie des modèles linéaires de pondération qui consiste à donner un poids à chaque critère défini sur une base subjective. Un score sera finalement donné à chaque alternative en faisant le cumul des performances de chaque critère multiplié par un facteur de pondération. L'alternative ayant le score le plus élevé sera retenue comme la meilleure des alternatives du point de vue des critères définis. La méthode Delphi a permis de pondérer les critères pour l'application de la méthode AHP. Une enquête faite au près de quelques experts du domaine a permis de prioriser et pondérer les différents indicateurs choisies pour l'application de la méthode AHP.

Finalement, des poids de 49 % et 51% seront affectées respectivement à la technique et au prix. Ces poids permettent de prioriser l'aspect coût par rapport à l'aspect technique. Les résultats de

cette partie seront utilisés pour formuler la recommandation de la méthode la plus adéquate dans le cadre opérationnel d'HQ. Les indicateurs ou les alternatives prises en compte à ce niveau sont les suivants :

7.2.2 Définition des critères

i. C1 : Qualité des résultats

La qualité des résultats obtenus par simulation du modèle selon les besoins de qualité de la compagnie (précision des simulations des modèles).

ii. C2: Qualité des Mesures

La qualité et la disponibilité des données d'entrée utilisables tant pour la calibration des modèles que pour la simulation des résultats.

iii. C3 : Calibration

Les difficultés liées au paramétrage et à la calibration du modèle hydrométrique en l'état actuel de la capacité de la compagnie.

iv. C4 : Exploitation des résultats

L'objectif d'utilisation des résultats du modèle selon les besoins de la compagnie (en fonction des besoins d'exploitation, est ce que les données de sortie sont suffisantes pour l'exploitation?).

v. C5 : Temps de calcul

Le temps nécessaire en l'état actuel de la capacité de la compagnie pour la calibration et pour les simulations.

7.2.3 Définition des alternatives

i. Alternative 1 : HYDROTEL

L'utilisation du modèle HYDROTEL pour simuler les débits journaliers et ainsi reconstituer les bases de données historiques.

ii. Alternative 2 : HSAMI

L'utilisation du modèle HSAMI pour simuler les débits journaliers et ainsi reconstituer les bases de données historiques.

iii. Alternative 3 : Combinaison HSAMI-HYDROTEL

L'utilisation de la combinaison des modèles HYDROTEL et HSAMI pour simuler les débits journaliers et ainsi reconstituer les ANR journaliers historiques. En clair, les deux modèles seront utilisés différemment en fonction de leur capacité à mieux représenter le comportement hydrologique des BV étudiés.

7.2.4 Estimation numérique de l'échelle verbale

Le Tableau 7.1 (Mballa, Réseau de drainage et d'assainissement MGC867, 30 avril 2014), présente la valeur numérique attribuée en fonction d'un jugement verbal.

Tableau 7.1: Estimation numérique de l'échelle verbale

Échelle numérique	Échelle verbale
1	Importance égale des deux éléments
3	Un élément est un peu plus important que l'autre
5	Un élément est plus important que l'autre
7	Un élément est beaucoup plus important que l'autre
9	Un élément est absolument plus important que l'autre
2, 4, 6, 8	Valeurs intermédiaires entre deux jugements, utilisés pour affiner le jugement

7.3 Résultats

L'analyse des résultats obtenus dans le présent chapitre permet de qualifier l'alternative à retenir pour reconstituer les ANR. Cette analyse permettra de valider l'utilisation des différents modèles par rapport aux objectifs de précision fixés par la présente étude.

7.3.1 Estimation des différents poids

Il est question à ce niveau de déterminer les différents poids attribués respectivement au duo Critère-Critère et Critère-Alternative. Les critères analysés sont ceux présentés à la section 7.2.2. Les alternatives considérées et analysés sont présentés à la section 7.2.3.

i. Poids Critères-Critères

➤ C1 : Qualité des résultats

- C1 : d'importance égale que la Qualité des mesures (C2);
- C1 : un peu plus important que la Calibration (C3);
- C1 : plus important que l'Exploitation des résultats (C4);

- C1 : Absolument plus important que le Temps de calcul (C5);

➤ **C2 : Qualité des mesures**

- C2 : un peu plus important que la Calibration (C3);
- C2 : plus important que l'Exploitation des résultats (C4);
- C2 : Beaucoup plus important que le Temps de calcul (C5);

➤ **C3 : Calibration**

- C3 : plus important que l'Exploitation des résultats (C4);
- C3 : Beaucoup plus important que le Temps de calcul (C5);

➤ **C4 : Exploitation des résultats**

- C4 : un peu plus important que le Temps de calcul (C5);

La Tableau 7.2 présente la combinaison binaire des critères par rapport à l'objectif global.

Tableau 7.2: Comparaison binaire des critères

	Qlt résultats	Qlt mesure	Calibration	Exploitation résult	Temps de calcul	Vecteur de priorité
Qlt résultats	1,00	1,00	3,00	5,00	9,00	0,35
Qlt mesure	1,00	1,00	3,00	6,00	8,00	0,35
Calibration	0,33	0,33	1,00	7,00	7,00	0,20
Exploitation résult	0,20	0,17	0,14	1,00	4,00	0,07
Temps de calcul	0,11	0,13	0,14	0,25	1,00	0,03
Total	2,64	2,63	7,29	19,25	29,00	1,00

ii. **Poids Critères -Alternatives**

➤ **Alternatives par rapport à la Qualité des résultats (C1)**

- Alt I : un peu plus important que l'alternative II (Poids=3fois);
- Alt I : un peu plus important que l'alternative III (Poids=2fois);
- Alt III : un peu plus important que l'alternative II (Poids=2fois);

➤ **Alternatives par rapport à la Qualité des mesures (C2)**

- Alt I : plus important que l'alternative II (Poids=4fois);
- Alt I : un peu plus important que l'alternative III (Poids=3fois);
- Alt III : un peu plus important que l'alternative II (Poids=2fois);

➤ **Alternatives par rapport à la Calibration (C3)**

- Alt II : un peu plus important que l'alternative I (Poids=3fois);
- Alt II : un peu plus important que l'alternative III (Poids=2fois);

- Alt III : un peu plus important que l'alternative I (Poids=2fois);

➤ **Alternatives par rapport à l'Exploitation des résultats (C4)**

- Alt I : un peu plus important que l'alternative II (Poids=3fois);
- Alt I : un peu plus important que l'alternative III (Poids=2fois);
- Alt III : un peu plus important que l'alternative II (Poids=2fois);

➤ **Alternatives par rapport au Temps de (C5)**

- Alt I : plus important que l'alternative II (Poids=5fois);
- Alt I : un peu plus important que l'alternative III (Poids=3fois);
- Alt III : un peu plus important que l'alternative II (Poids=3fois);

iii. Évaluation globale

Les résultats du Tableau 7.3 montrent que l'alternative Alt I a une pondération de 50%. Néanmoins la combinaison des deux approches HYDROTEL-HSAMI pour la reconstitution des apports historiques reçoit une pondération de 23%. La combinaison HYDROTEL-HSAMI est une solution plus adéquate que l'utilisation unique du modèle HSAMI.

Tableau 7.3: Évaluation globale

	Qlt résultats	Qlt mesure	Calibration	Exploitation résult	Temps de calcul	Poids des alt.
	0,35	0,35	0,20	0,07	0,03	
OPTIONS						
alt.I	0,54	0,62	0,16	0,54	0,63	0,50
alt.II	0,16	0,14	0,54	0,16	0,11	0,23
alt.III	0,30	0,24	0,30	0,30	0,26	0,28
Total	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

CHAPITRE 8 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Les apports naturels sont simulés par le modèle HYDROTEL. Les séries de données d'entrée hydrométriques et météorologiques utilisées dans cette simulation sont présentées respectivement aux sections 5.1.1 et 5.1.2.

Les simulations d'HYDROTEL ont permis de désagréger des débits mensuels en débits journaliers pour la reconstitution des données historiques sur les BV des SH de Saint-Maurice.

Les résultats du BV Beaumont du SH de Saint-Maurice sont présentés dans les sections suivantes.

8.1 Les données entrée et la modélisation

8.1.1 Les données d'entrée du BV Beaumont

Le BV Beaumont a une superficie de 3097 km². Les grilles distribuées de météorologique sur une période de 1985 à 2014 sont utilisées pour la simulation. Les séries de données harmonisées disponibles sur la période de 2005 à 2015, sont été utilisées pour la calibration et pour la validation du modèle HYDROTEL.

8.1.2 La modélisation du BV Beaumont

Un nombre total de 145 UHRH a été modélisé pour refléter les conditions du terrain et la répartition spatiale du climat (données météorologiques) du BV Beaumont. Différentes informations ont été prises en compte par l'entremise des paramètres suivants :

i. Indice foliaire

Par cet indice, le modèle prend en compte les types de couvert forestiers de conifère, de Feuillus et de grands arbustes sur le bassin de Beaumont. La présence de roc localisée sur le bassin est aussi prise en compte.

ii. Indice Profondeur racinaire

Ici, le modèle prend en compte la hauteur (m) des types de végétation rencontrés sur le BV. Ces hauteurs sont égales à 3 mètres pour les grands arbres et les feuillus, et à 2m pour les conifères.

iii. Paramètre de distribution spatiale

Par ce paramètre, la distribution spatiale de l'occupation du sol, des types de sols et des propriétés hydrauliques sont pris en compte. Le modèle prend en compte respectivement la représentativité des différents types d'arbres (couvert végétal), des différents types de sol, et les propriétés hydrauliques des sols par type de sols sur l'ensemble du BV Beaumont.

8.2 Résultats de la modélisation hydrologique

La Figure 8.1 présente la variation des données d'entrée prises en compte dans la modélisation.

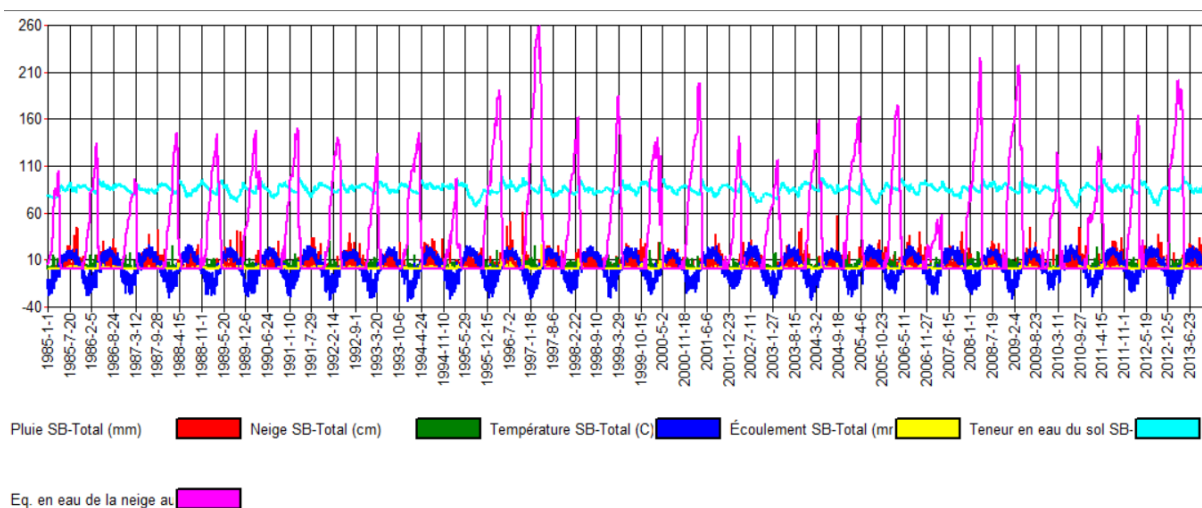


Figure 8.1: Variabilité des données d'entrée du BV Beaumont et Vermillon

Les éléments suivants du bassin Beaumont sont représentés :

- La variation de la pluie (mm) et de la neige (mm);
- La variation de la température (degré Celsius);
- La variation de l'écoulement total;
- La variation de la teneur en eau du sol;
- La variation de l'équivalent en eaux de la neige.

8.3 Résultats du modèle terrain

Le modèle terrain réalisé prend en compte la modélisation des éléments suivants :

- Altitude moyenne par UHRH;

- Pente moyenne par UHRH;
- Type de sol par UHRH;
- Occupation du sol par UHRH;

Les résultats du modèle terrain produit par le modèle PHYSITEL sont présents sur les figures allant de la Figure 8.2 à la Figure 8.5 .

i. Modélisation de l'altitude moyenne par UHRH

La Figure 8.2 présente la modélisation de l'altitude moyenne enregistrée sur l'ensemble du bassin cumulé de Beaumont par UHRH.

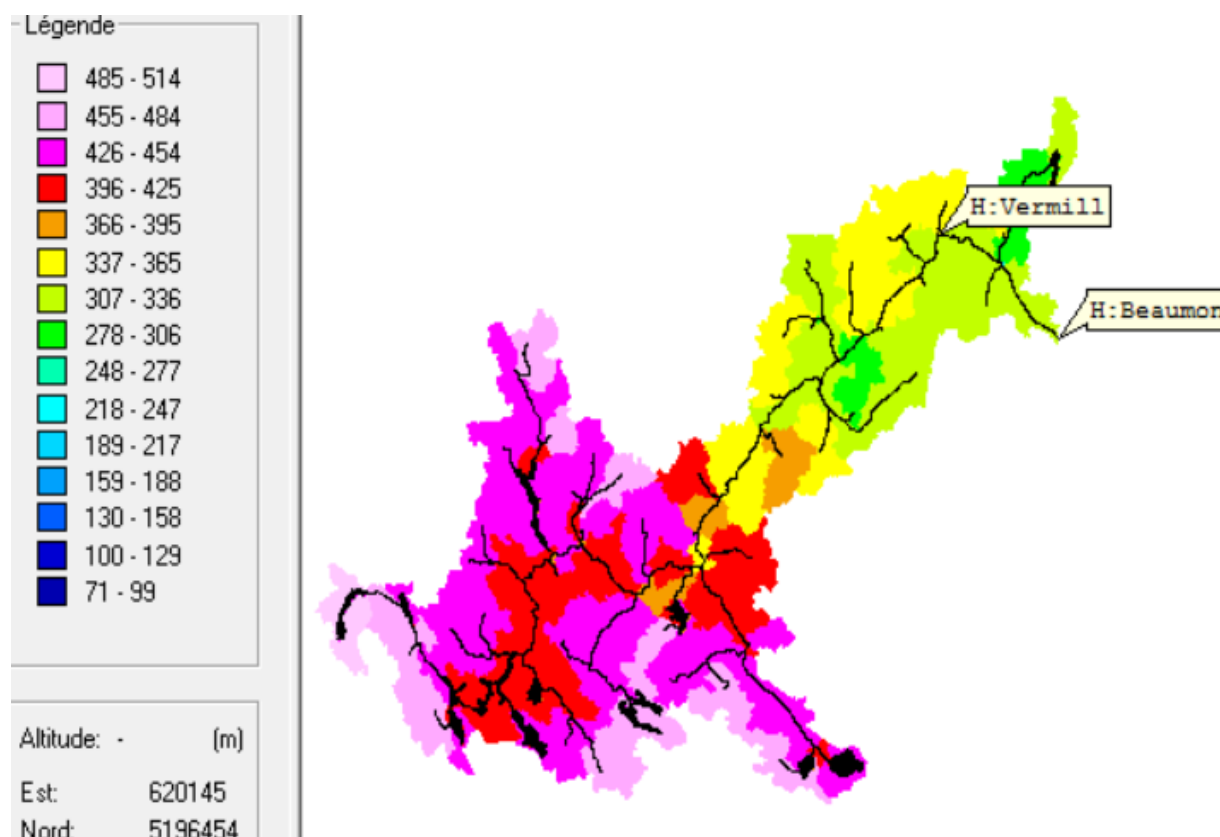


Figure 8.2: Modélisation d'altitude moyenne par UHRH des BV Beaumont et Vermillon

La Figure 8.2 donne une idée globale du sens d'écoulement des eaux de ruissèlement de l'amont du bassin illustré par la couleur rose pâle (altitude de 485m) vers l'aval illustré par la couleur vert clair (Altitude 278)

ii. Modélisation de la Pente moyenne par UHRH

La Figure 8.3 présente la modélisation de la pente moyenne sur chaque UHRH des bassins de Vermillon et Beaumont. L'analyse de la Figure 8.3 indique que le bassin cumulé Beaumont possède des pentes comprises entre 0.1655% et 0.084% en général. Les pentes sur le bassin cumulé de Beaumont sont donc assez douces. Des pentes plus douces (0,1927% à 0,2197%) sont localisées à l'exutoire du bassin cumulé.

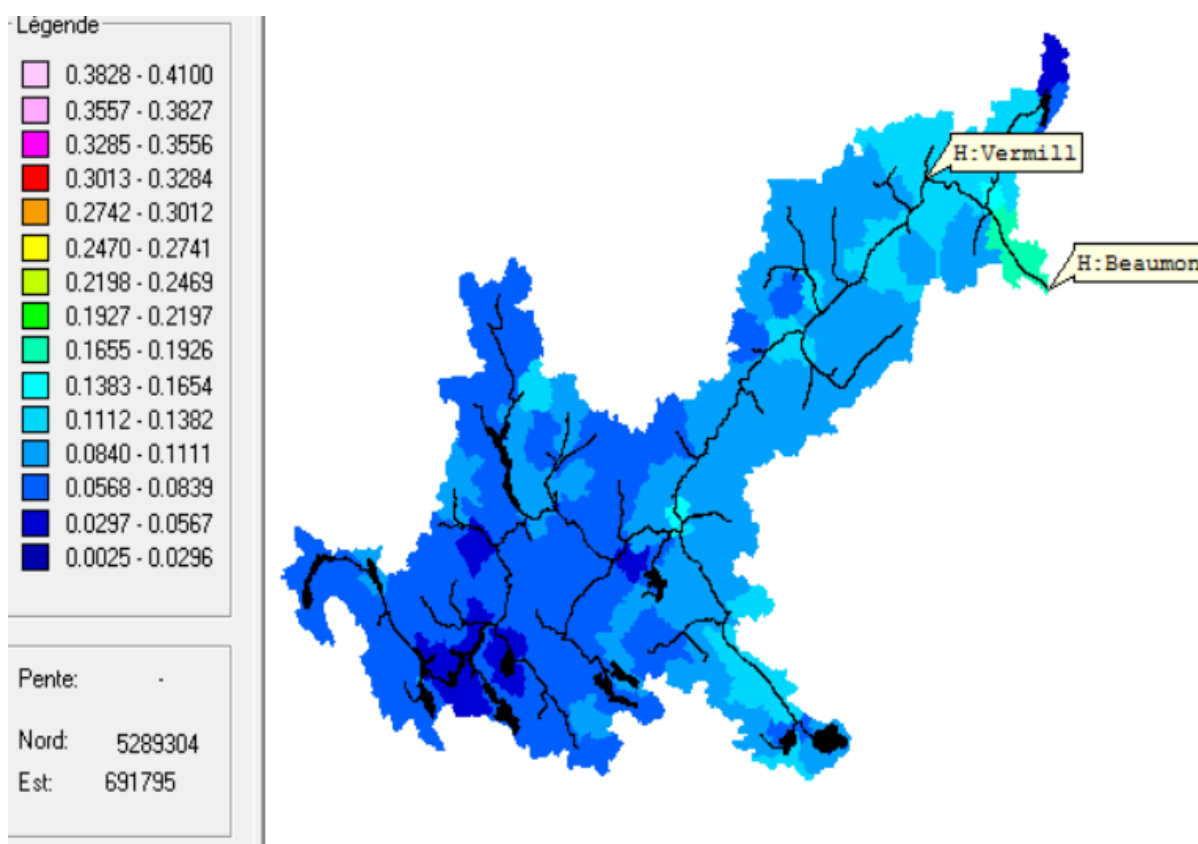
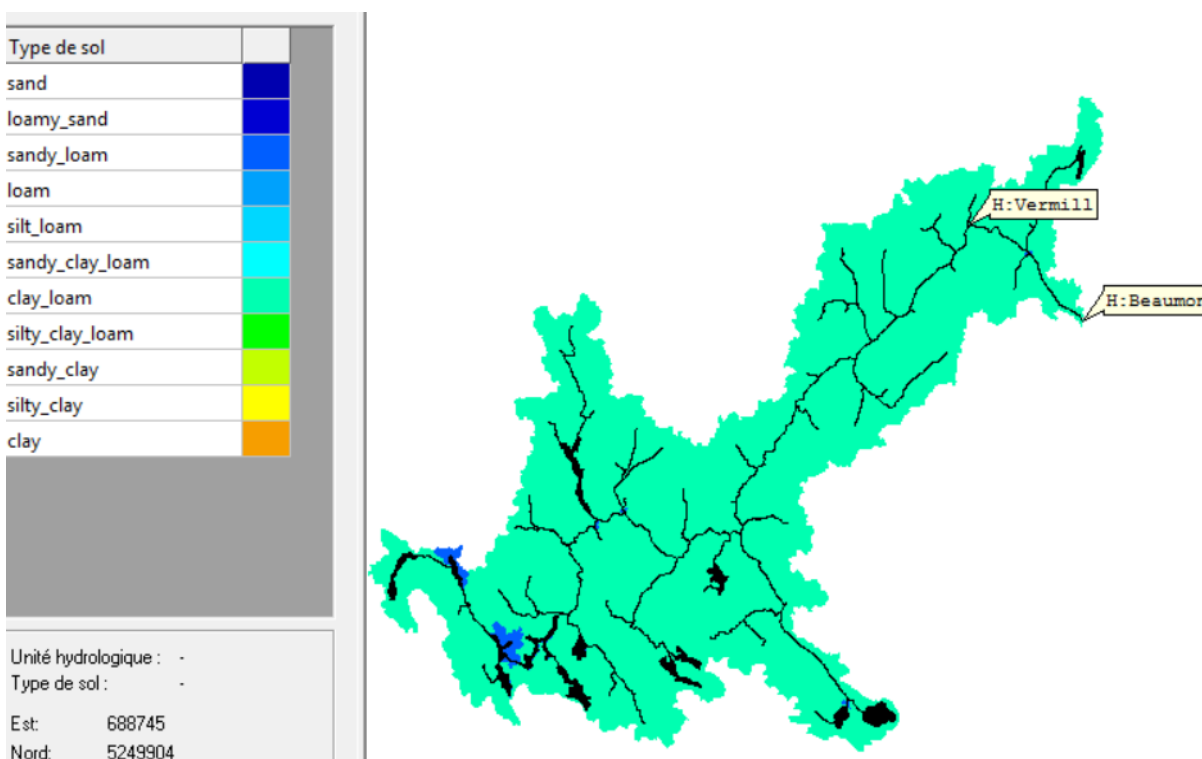


Figure 8.3: Modélisation de pente moyenne par UHRH des BV Beaumont et Vermillon

L'analyse des Figure 8.2 et Figure 8.3 montre une corrélation d'une part entre les pentes fortes et l'altitude moyenne élevée et d'autre part entre les pentes faibles et l'altitude moyenne base.

iii. Modélisation de la Pente moyenne par UHRH

La Figure 8.4 présente la modélisation du type de sol sur chaque UHRH des bassins de Vermillon et Beaumont. L'analyse de la Figure 8.4 révèle que le sol du bassin cumulé Beaumont est constitué principalement d'argile limoneuse. Quelques UHRH de type de sol terreau sableux sont localisés en amont du bassin cumulé.



Sand	Laomy sand	Sandy loam	loam	Silt loam	Sandy clay loam	Clay loam	Silty clay loam	Sandy clay	Silty clay	clay
sable	Sable limoneux	Terreau sableux	Terreau	Silt limoneux	Sablo-argileux	Terreau argileux	Limono-argileux	Silt sableux	Silt argileux	argile

Figure 8.4: Modélisation de type de sol par UHRH des BV Beaumont et Vermillon

iv. Modélisation de l'occupation du sol par UHRH

La Figure 8.5 présente la modélisation de l'occupation du sol sur chaque UHRH des bassins de Vermillon et Beaumont. La représentation sur la Figure 8.5 prend en compte différents informations enregistrées sur chaque UHRH. Les informations stockées dans l'UHRH sont les suivantes :

- La présence de roc sur le BV;
- Le type de couvert végétal (grand arbre, feuillus, Conifère) présent sur le BV;

- La taille de type du type de couvert végétale forêt présent sur le BV;
- La présence d'eau sur le BV.
- Le ratio des types de couvert végétal.

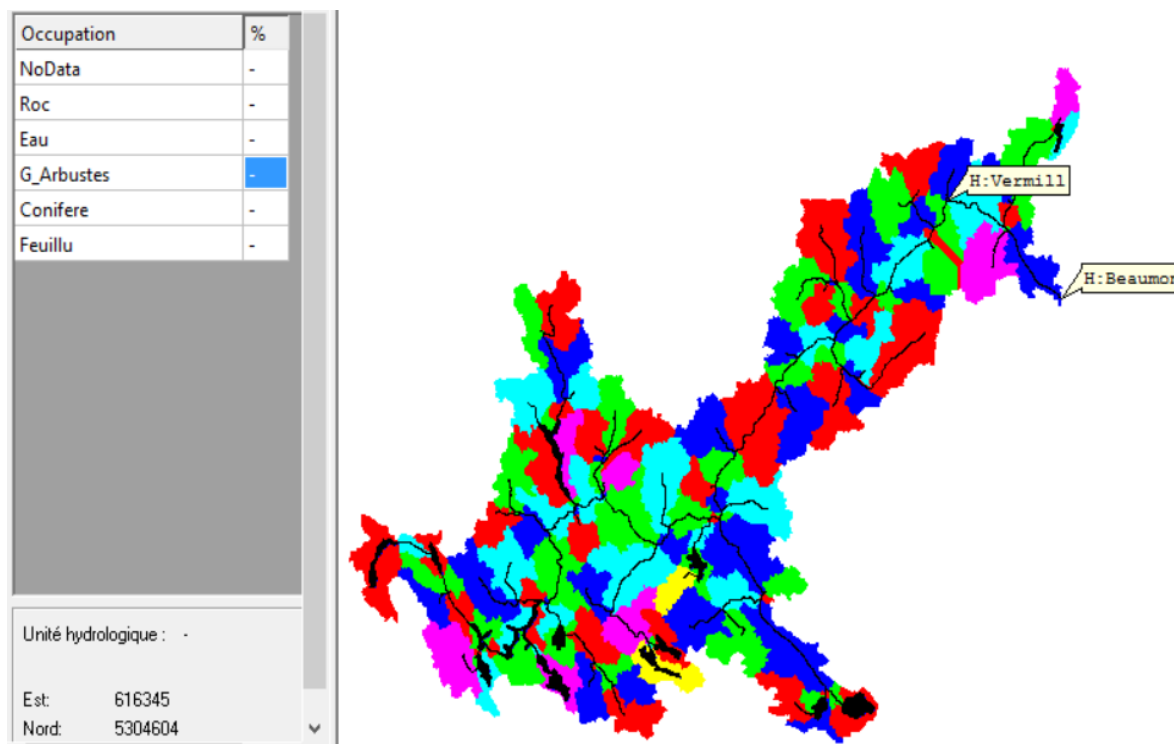


Figure 8.5: Modélisation de l'occupation du sol par UHRH des BV Beaumont et Vermillon

Les informations sont fournies en pourcentage, ce qui reflète la représentativité des différents éléments sur l'UHRH.

Le plan de la Figure 8.4 dans le modèle HYDROTEL est interactif. Chaque UHRH sélectionné permet de connaître les différents paramètres ci-dessus, en fonction de la localisation du UHRH sur le bassin cumulé Beaumont.

8.4 Résultats de la simulation

La Figure 8.6 présente les résultats de la simulation des éléments hydrologiques du bassin Beaumont du système hydrique Saint-Maurice.

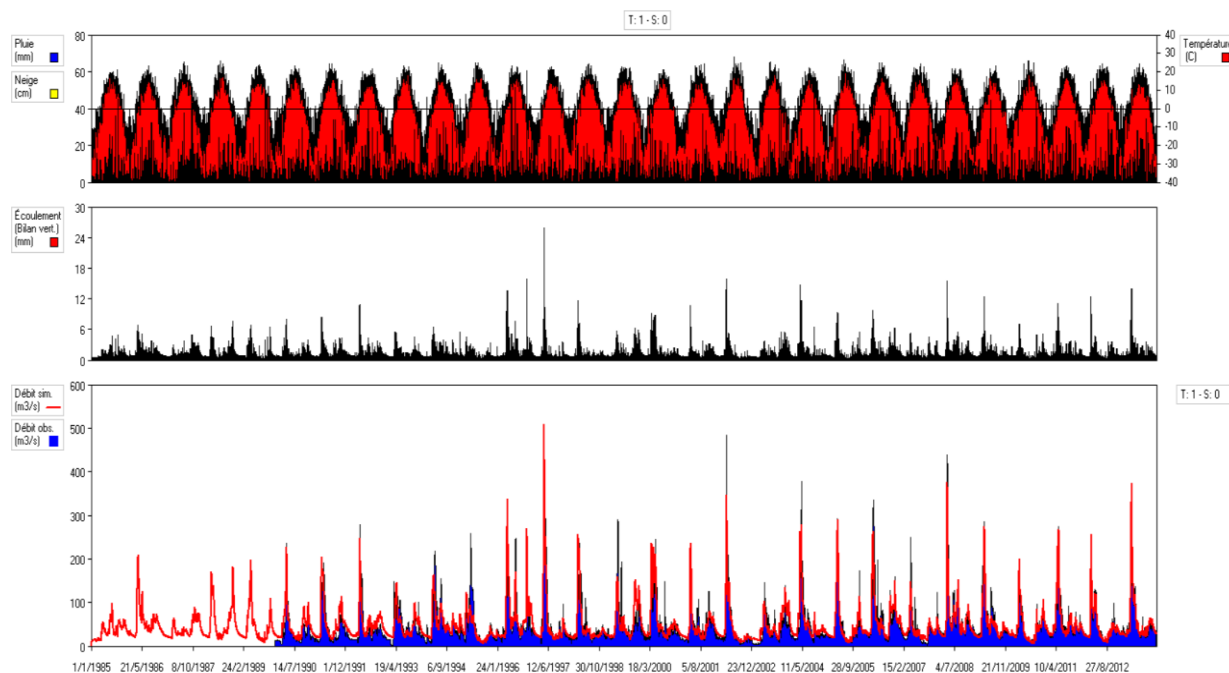


Figure 8.6: Synthèse du comportement hydrologique des BV Beaumont et Vermillon

Les débits simulés sur le bassin Beaumont sont présentés sur la Figure 8.7.

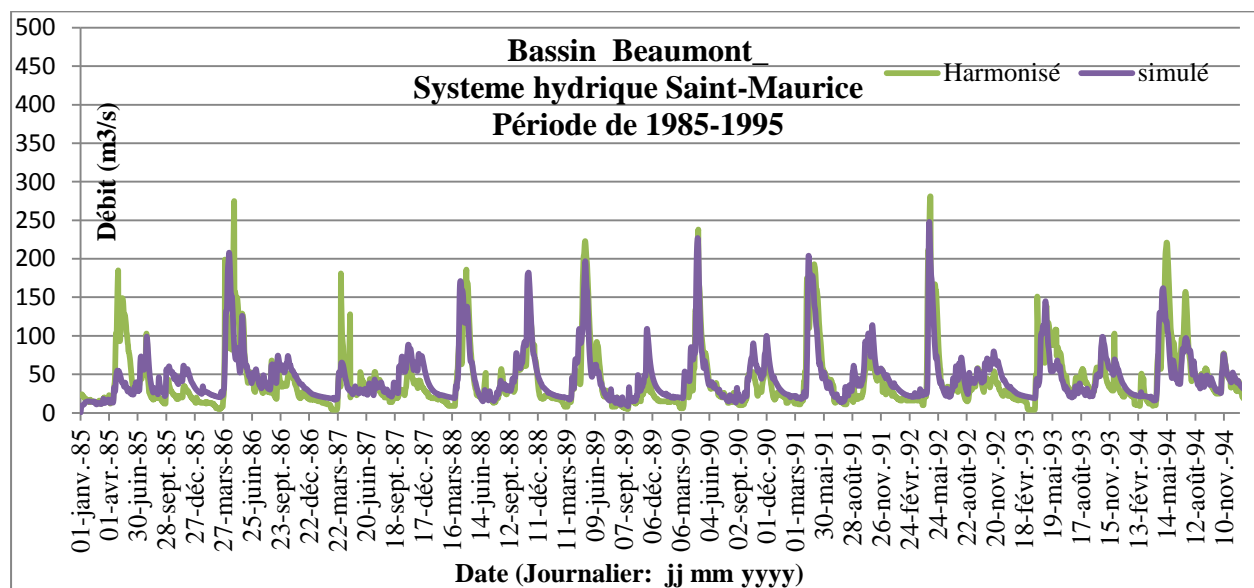


Figure 8.7: Débits journaliers simulés des BV Beaumont et Vermillon

8.5 Analyse des débits simulés du bassin Beaumont.

Les résultats sont présentés sous forme de graphe en les comparant aux séries disponibles à HQ. En effet, Les résultats sont comparés aux séries de données filtrés, calculés et harmonisés. Les Figure 8.8 à Figure 8.18 présentent les résultats respectivement pour le pas de temps journalier, mensuel, saisonnier et annuel.

8.5.1 Variation Journalière

Les Figure 8.8 à la Figure 8.10 présentent spécifiquement les variations des débits journaliers simulés par le modèle HYDROTEL.

i. Période 1985-1995

L'analyse montre que la variation journalière des débits simulés suit la variation des débits harmonisés. La valeur moyenne du débit de base de la série des débits simulés, illustrée sur la Figure 8.8 est supérieure à celle de la série des débits harmonisés sur la période de 1985 à 1995. Des valeurs élevées de débits harmonisés (pics de la décennie) ne sont pas réalisées par le modèle HYDROTEL. Les différences dans cette période pourrait est dû à la qualité des données d'entrée.

ii. Période 1995-2005

L'analyse de la Figure 8.9 indique que la variation journalière des débits simulés suit la variation des débits harmonisés. Contrairement à la période 1985-1995, la valeur moyenne du débit de base de la série simulée est inférieure à celle de la série harmonisée. Des valeurs élevées de débits harmonisés ne sont pas toujours réalisées par le modèle HYDROTEL.

iii. Période 2005-2013

L'analyse de la Figure 8.10 confirme que la variation journalière des débits simulés suit toujours la variation des débits harmonisés. Sur la présente période, la valeur moyenne du débit de base des deux séries de données est presque identique. Après l'année 2008, les valeurs élevées de débits harmonisés sont réalisées par le modèle HYDROTEL.

En général, les débits de faibles intensités sont assez bien réalisés sur toutes les périodes par le modèle HYDROTEL. Examinée dans son ensemble, la série simulée permet d'apprécier la corrélation entre la météo et les débits d'apports journaliers.

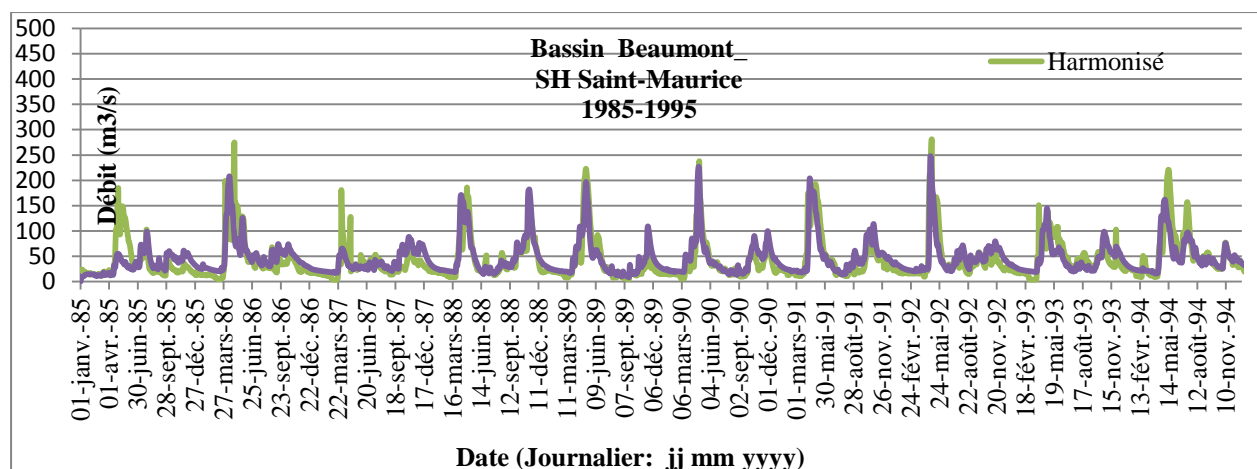


Figure 8.8: Cycles journaliers des débits _ BV Beaumont _Période 1985-1995

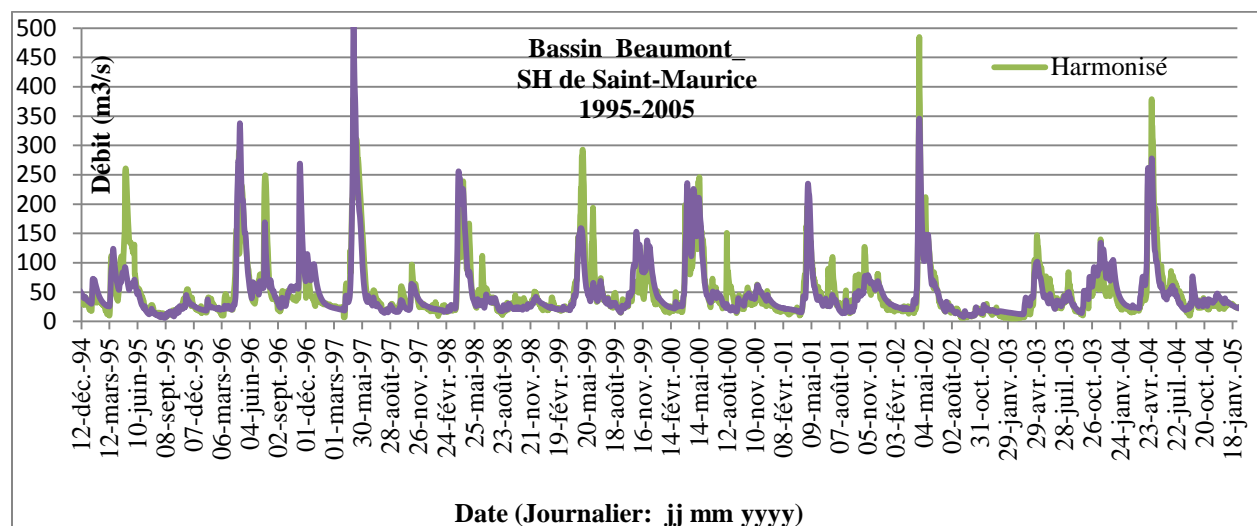


Figure 8.9: Cycles journaliers des débits _ BV Beaumont _Période 1995-2005

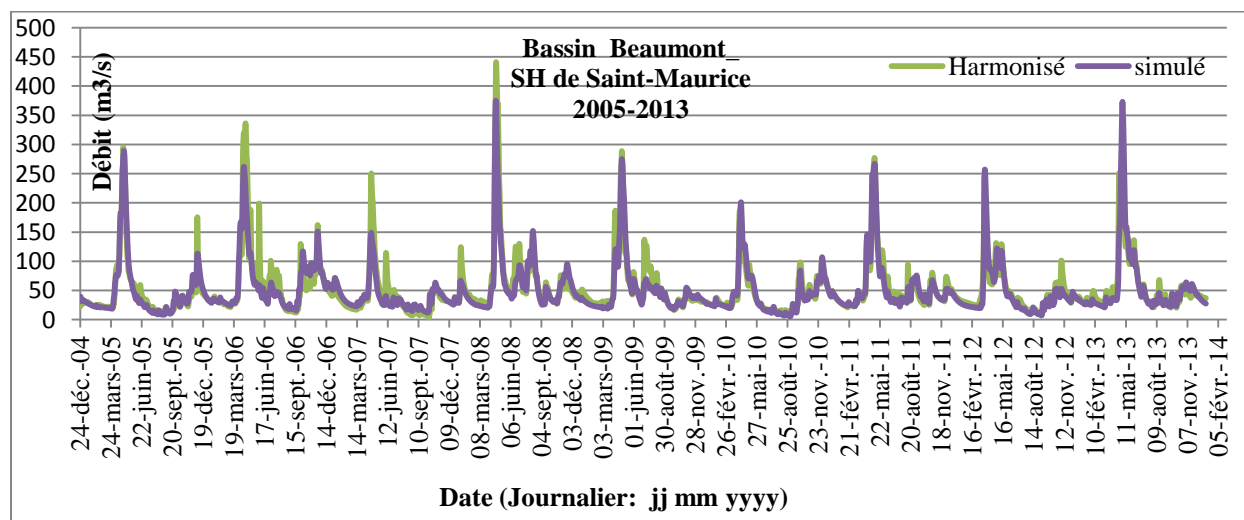


Figure 8.10: Cycles journaliers des débits _ BV Beaumont _Période 2005-2013.

8.5.2 Variation mensuelle

Les Figure 8.11 à la Figure 8.14 présentent les variations des débits moyens mensuels simulés par le modèle HYDROTEL. Ces figures illustrent la variation des débits moyens mensuels simulés par rapport aux débits mensuels moyens des autres séries (filtrés, harmonisés, calculés).

i. Période 1985-2013

L'analyse globale de la Figure 8.11 montre que les débits moyens mensuels simulés suivent la variation des débits mensuels harmonisés. A partir de l'année 2005, une bonne corrélation entre les différentes séries de débits moyens mensuels est observée. L'analyse de la variation des graphes de la Figure 8.11 montre que les pics des débits harmonisés sont plus élevés que des débits simulés à l'exception de la période allant de 1995 à 2003.

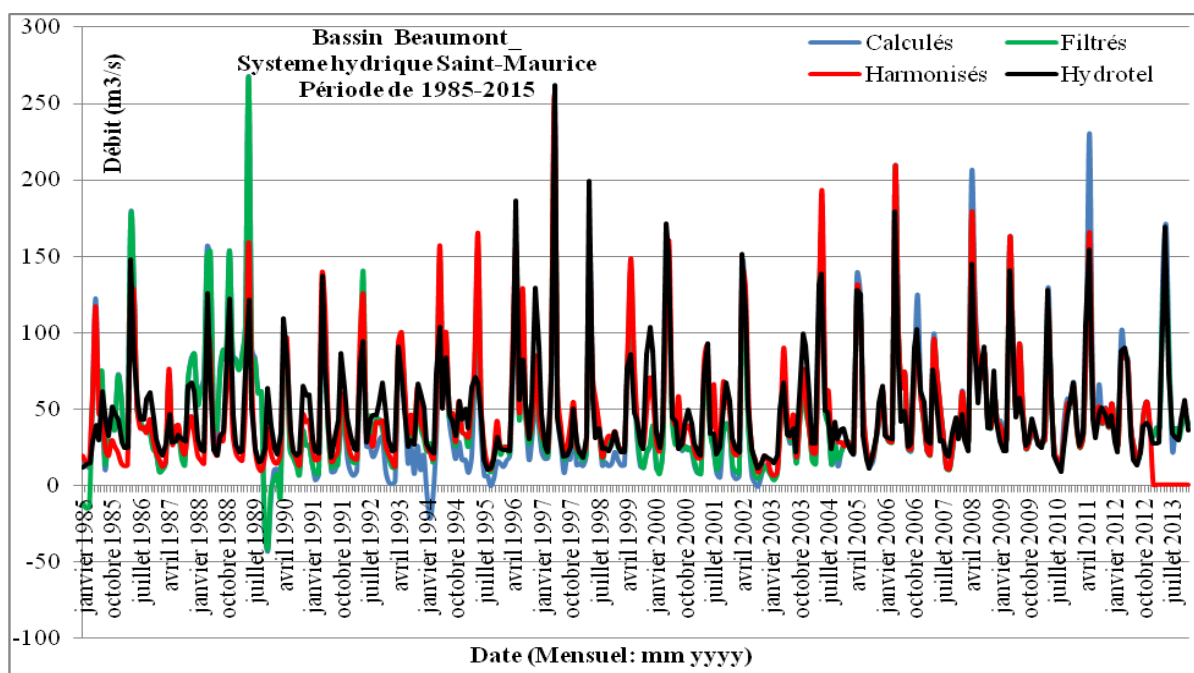


Figure 8.11: Cycles mensuels des débits _ BV Beaumont _Période 1985-2013

ii. Période 1985-1995

L'analyse de la Figure 8.12 montre que la variation mensuelle des débits moyens simulés suit la variation des débits moyens mensuels harmonisés. La valeur moyenne du débit de base mensuel de la série simulée, est supérieure à celle de la série harmonisée. Des valeurs élevées de débits harmonisés mensuels ne sont pas réalisées par le modèle HYDROTEL. Les valeurs moyennes faibles sont surestimés par HYDROTEL pour compenser les volumes perdus au niveau des pics.

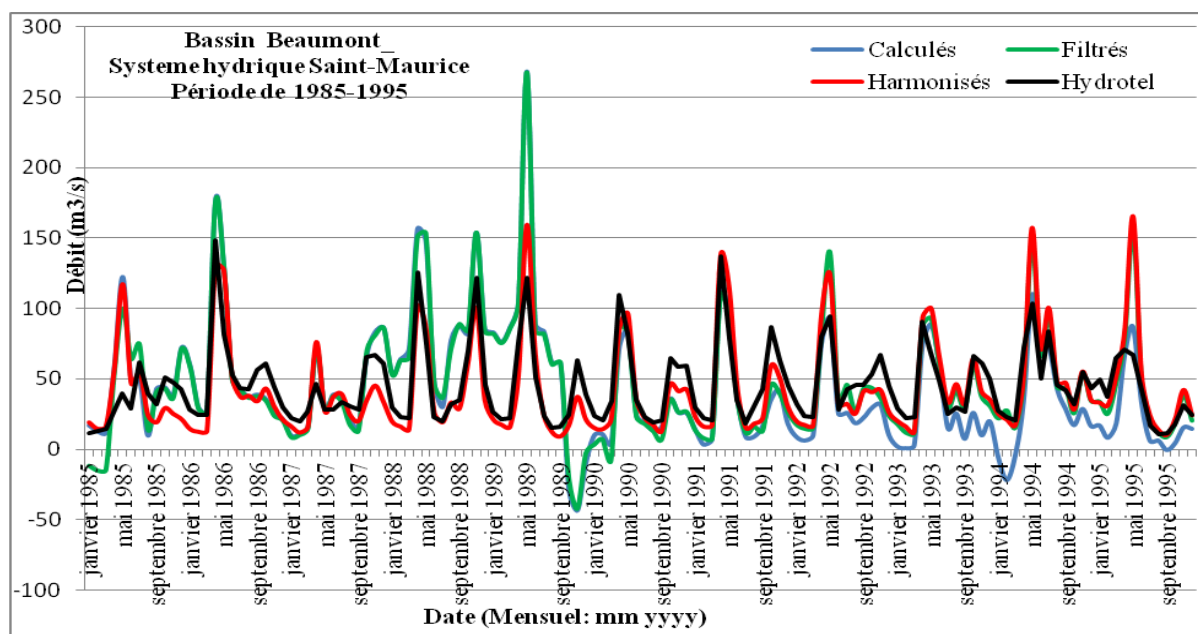


Figure 8.12: Cycles journaliers des débits _ BV Beaumont _Période 1985-1995

iii. Période 1995-2005

L'analyse de la Figure 8.13 indique que la variation mensuelle des débits moyens simulés suit la variation des débits harmonisés mensuels moyens.

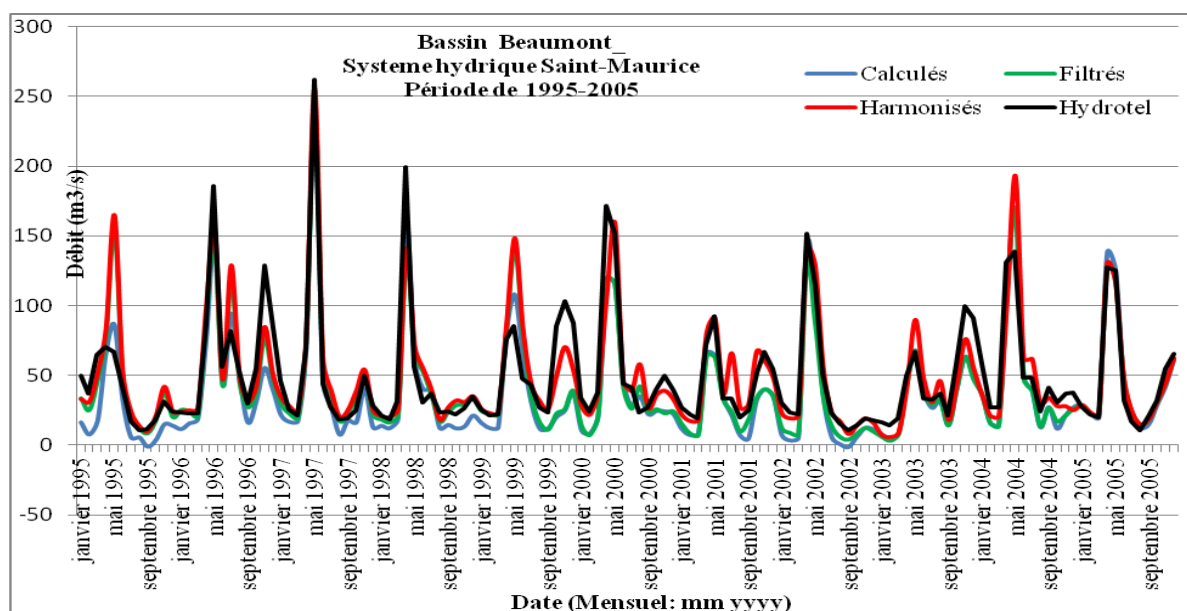


Figure 8.13: Cycles journaliers des débits _ BV Beaumont _Période 1995-2005

Contrairement à la période 1985-1995, la valeur moyenne du débit de base de la série simulée est semblable à celle de la série harmonisée à l'exception de l'année 2003. Par rapport à la période

de 1985-1995, les valeurs élevées de débits harmonisés sont en général bien réalisées par le modèle HYDROTEL à l'exception des pics enregistrés en 1995 et 2004.

iv. Période 2005-2013

L'analyse de la Figure 8.17 confirme que la variation mensuelle des débits simulés suit toujours la variation des débits mensuels harmonisés. Sur la présente période, la valeur moyenne du débit de base des deux séries de données est presque identique à l'exception de l'année 2007. Les valeurs élevées de débits mensuels harmonisés ne sont pas réalisées par le modèle HYDROTEL.

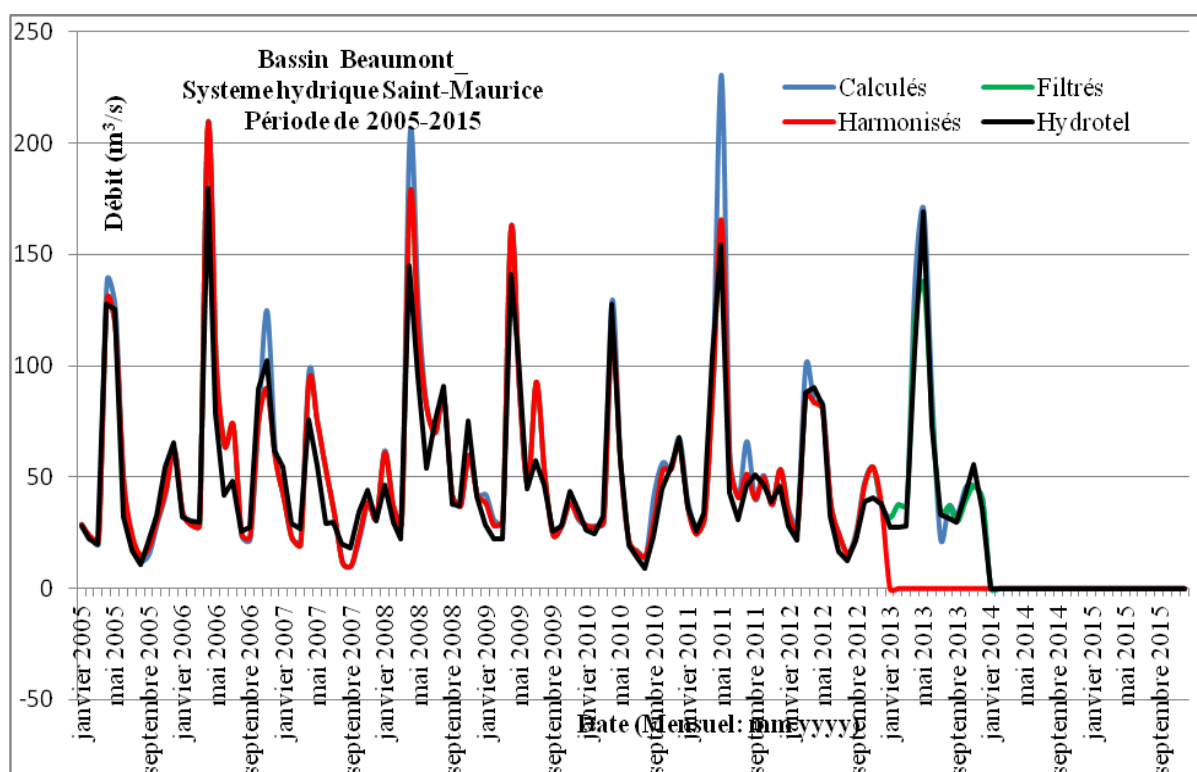


Figure 8.14: Cycles journaliers des débits _ BV Beaumont _ Période 2005-2015

8.6 Variation saisonnière

i. Période 1985-1995

De la Figure 8.15, à l'exception de la série filtrée, l'allure générale des séries analysées est identique. Les séries harmonisés et simulés ont la même tendance. La valeur moyenne du débit de base saisonnier de la série simulée, est supérieure à celle de la série harmonisée. Des valeurs élevées de débits harmonisés saisonniers ne sont pas réalisées par le modèle HYDROTEL. Les

valeurs moyennes faibles sont surestimés par HYDROTEL pour compenser les volumes perdus au niveau des pics.

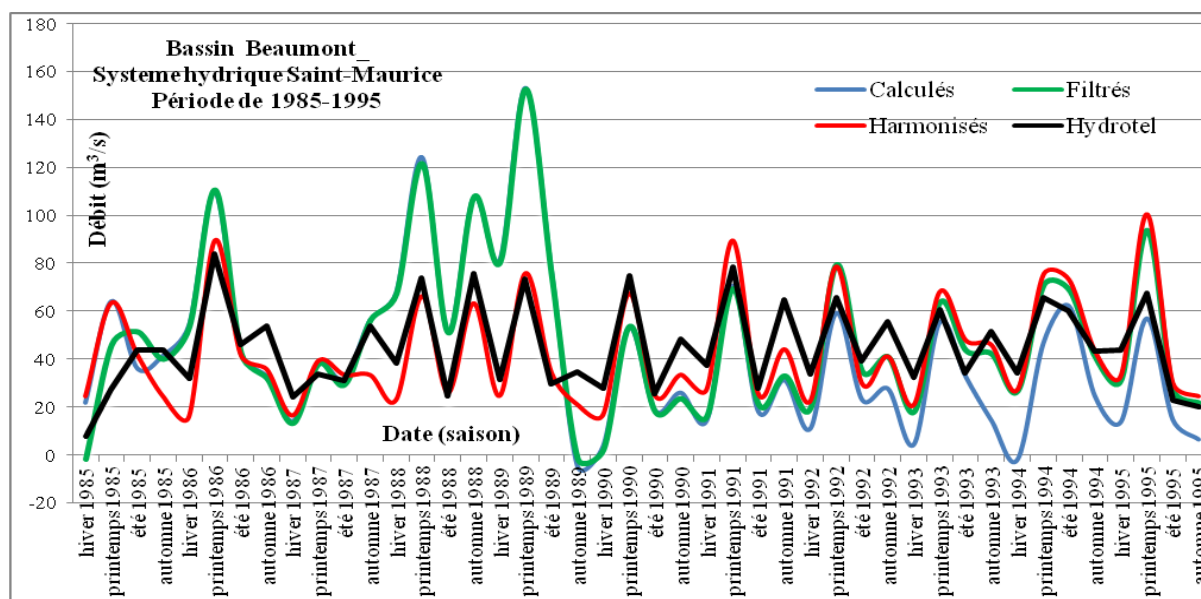


Figure 8.15: Cycles saisonniers des débits _ BV Beaumont _Période 1985-1995

ii. Période 1995-2005

L'analyse de la Figure 8.13 indique que la variation saisonnière des débits moyens simulés suit la variation des débits harmonisés saisonniers moyens.

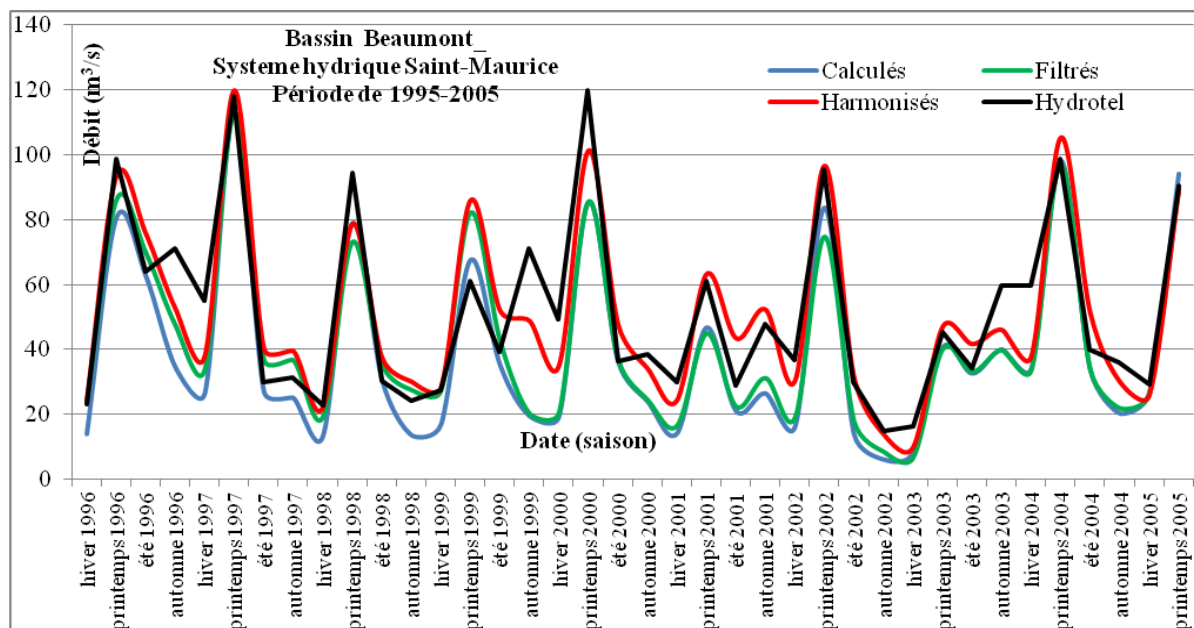


Figure 8.16: Cycles saisonniers des débits _ BV Beaumont _Période 1995-2005

De la Figure 8.16, à l'exception de la série filtrée, l'allure générale des séries analysées est identique à la fin de la période 1985-1995. La valeur moyenne du débit de base saisonnier de la série simulée, est toujours supérieure à celle de la série harmonisée. Les valeurs élevées de débits harmonisés saisonniers sont réalisées par le modèle HYDROTEL à l'exception de l'année 1999.

iii. Période 2005-2013

De la Figure 8.17, il apparaît que les débits harmonisés, calculés et simulés possèdent la même tendance pour la période allant de 2006 à 2013. A l'exception des années 2006 et 2008, les pics des débits saisonniers moyens harmonisés demeurent identiques aux pics des débits simulés. On observe donc une très bonne réconciliation des débits sur la base trimestrielle sur cette période.

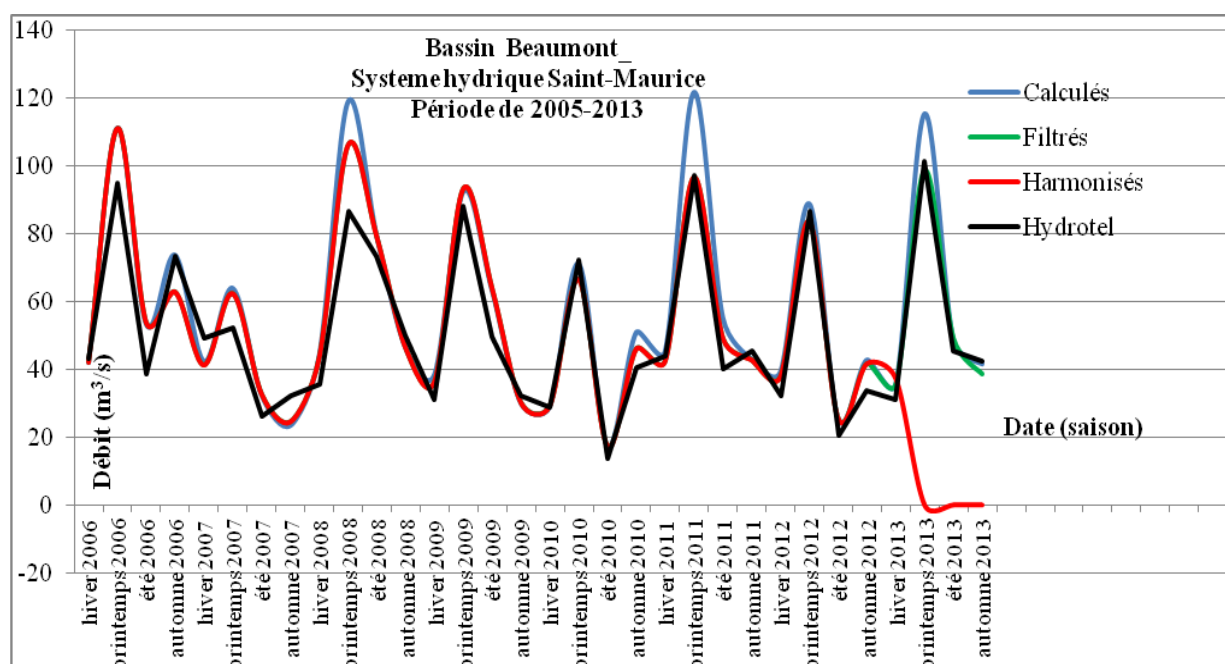


Figure 8.17: Cycles saisonniers des débits _ BV Beaumont _Période 2005-2013

8.7 Variation annuelle

De la Figure 8.18, il apparaît que les débits harmonisés et simulés possèdent la même tendance et évoluent de la même manière sur toute la période. L'analyse des graphes de cette figure montre que le débit moyen annuel simulé est plus élevé que le débit moyen annuel harmonisé avant 1995. Après 2005, les pics des débits moyens annuels harmonisés ne sont pas réalisés par la série annuelle simulée.

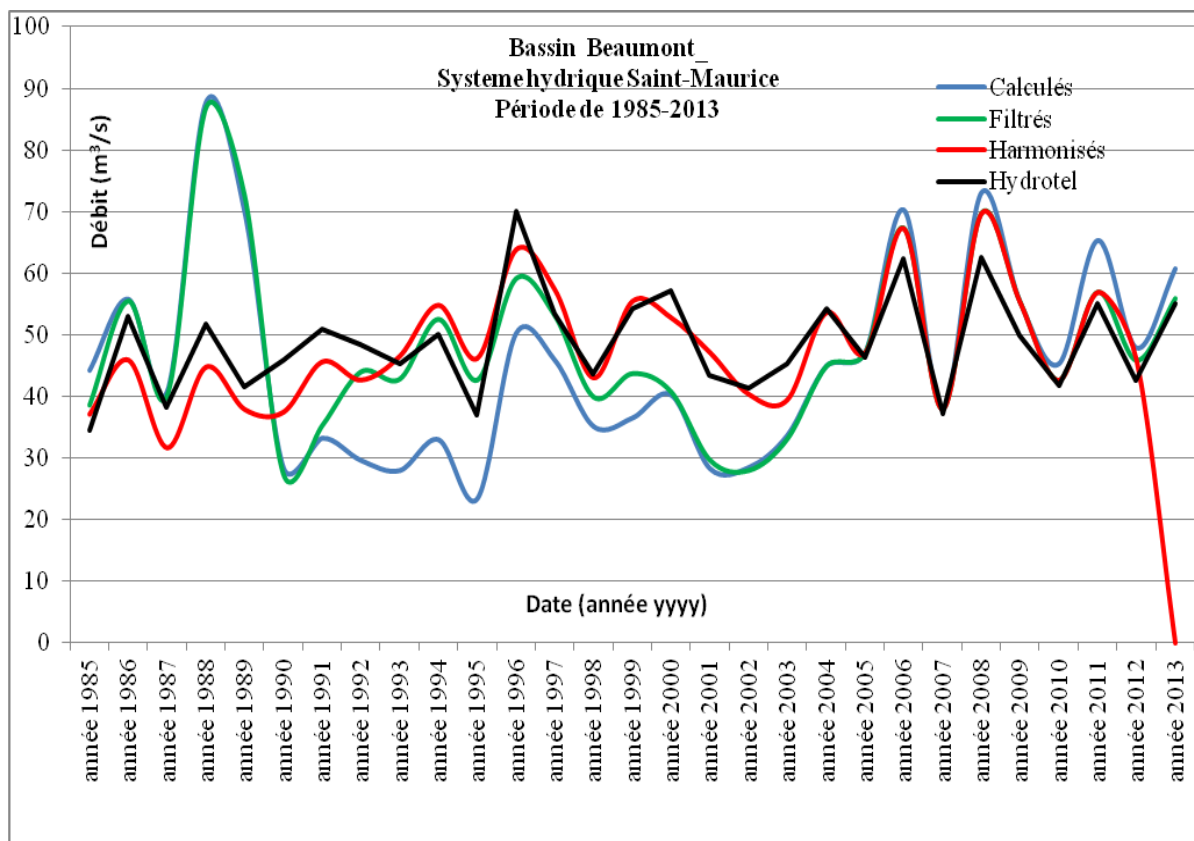


Figure 8.18: Cycles annuels des débits _ BV Beaumont _Période 1985-2013

8.8 Analyse des volumes

La variation du volume cumulé a été analysée afin d'évaluer la qualité des données simulées. De la Figure 8.19, il se dégage une tendance perceptible des séries simulés et harmonisés à se rapprocher. Néanmoins les débits cumulés de la série harmonisé demeurent légèrement faible par rapport au débit cumulé des séries simulés par HYDROTEL. Cet écart tend à se réduire vers l'année 2005, mais le débit cumulé harmonisé reste toujours inférieur à celui simulé.

Le cumul du débit filtré tend à suivre la même tendance à partir des années 2000. Mais avant le l'année 200, le débit filtré cumulé reste plus fort que les débits cumulés simulés et harmonisés.

Le débit calculé cumulé devient inférieure aux autres débits cumulés à partir de l'année 1994.

L'écart final entre les débits cumulé harmonisé et simulé peut être expliqué par la point de départ de la réconciliation des volumes. Mais cet écart demeure négligeable. La série de donnée simulée est assez représentatif de la série harmonisée.

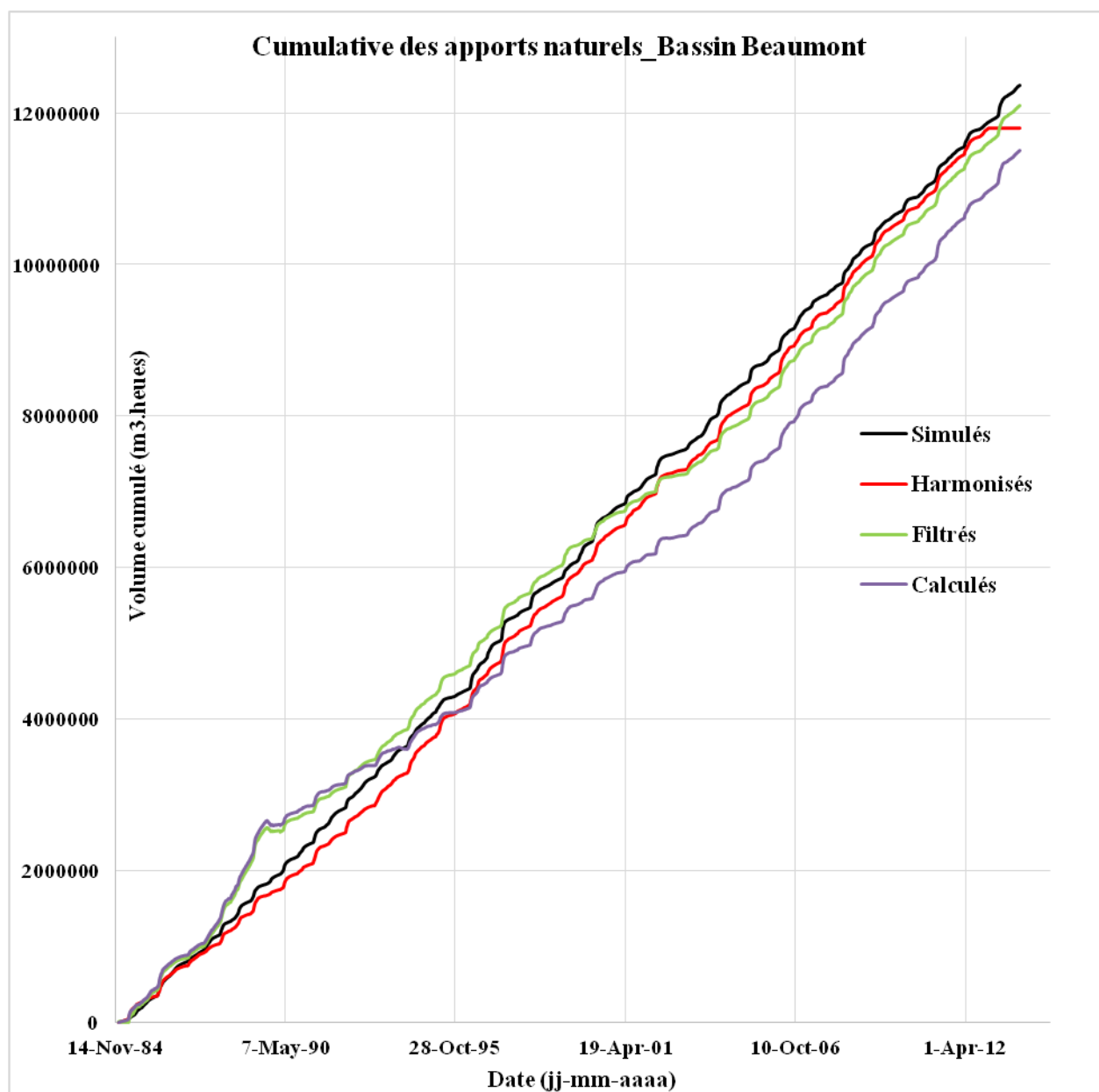


Figure 8.19: Variation des volumes d'eau cumulés _ BV Beaumont _ Période 1985-2013

CHAPITRE 9 SYNTHÈSE ET DISCUSSION

9.1 Discussion

i. Problématique

HQ est à la recherche d'une méthode faisant appel à l'utilisation de modèle hydrologique pour reconstituer les apports naturels historiques dans ses systèmes hydriques. HQ possède des séries d'apports mensuels qu'elle souhaiterait désagréger en apports journaliers. L'approche recherchée devra être automatique et surtout intégrer les données d'entrée (les séries hydrométriques et météorologiques) disponibles dans la base de données. Les séries de données reconstituées devront refléter la réalité hydrologique des bassins étudiés. Les débits simulés devront être comparables aux débits mensuels disponibles. Deux modèles hydrologiques sont en cours d'expérimentation chez HQ. Cette étude devrait optimiser l'utilisation de ces modèles et recommander l'utilisation future de l'un pour reconstituer les apports historiques.

ii. Performance des modèles

A la question de la qualification de l'utilisation des deux modèles en expérimentation chez HQ, les modèles HSAMI (modèle global) et HYDROTEL (modèle semi-distribué) ont été calibrés et optimisés. Les critères de NSE et le KGE ont été évalués pour la calibration et la validation des deux modèles. Les calibrations ont été optimisées en passant respectivement par la calibration sur les séries de données de qualité, en distinguant des paramètres de simulation par saison et par BV. Les résultats ont fournis à chaque BV une chaque système hydrique une combinaison de paramètres calibrés. Le principal critère du NSE a été analysé par modèle hydrologique pour chacun des BV en général et en particulier pour le BV Beaumont. Les résultats des valeurs de NSE obtenus sont présentés au Tableau 9.1. Les valeurs de NSE obtenues pour le modèle HYDROTEL sont supérieures aux valeurs obtenues avec HSAMI.

Tableau 9.1: Valeurs de NSE des BV du SH Saint-Maurice

Bassin	HYDROTEL	HSAMI
	NSE	NSE
Beaumont	0.75	0.5685
Rapide-Blanc a C et Gouin	0.87	0.8139
La Tuque	0.69	0.7937
Trenche	0.84	0.7431

9.2 Critique

i. Les limites de l'étude

Les résultats sont obtenus en fonction de données d'entrée disponibles. Les données météorologiques et hydrologiques utilisées pour la calibration des modèles d'une part pour la simulation des apports journaliers, et d'autre part présentent des données manquantes. L'utilisation des moyennes journalières, mensuelles, saisonnières et annuelles dans la validation de ces données a permis de négliger ces valeurs manquantes. Ce qui dispense les conclusions de cette étude des impacts que des valeurs manquantes ont sur la précision des résultats obtenus. La qualité des données météorologiques utilisées a été invalidée. Les séries SPAN utilisées possèdent des incohérences et des erreurs. Dans le cadre opérationnel d'HQ, en prenant en compte la qualité des données d'entrée disponibles, des moyens d'acquisition des données et les résultats, la méthode présentée ici pourrait fournir des résultats plus optimisés avec des données d'entrées de meilleure qualité. Cela permet aux résultats d'être plus représentatifs des bassins étudiés. L'étude comparative qui a qualifié l'utilisation du modèle HYDROTEL au détriment du modèle HSAMI pourrait aboutir à une confirmation du choix du modèle HYDROTEL ou simplement aboutir à une autre conclusion. Compte tenu des capacités actuelles d'HQ en termes d'acquisition des données, le paramètre coût d'acquisition des données n'a pas été un facteur déterminant dans le choix du modèle adéquat. Le choix s'est basé principalement sur la précision des débits journaliers simulés.

Les méthodes d'acquisition des données d'entrée n'ont pas été validées dans la présente étude. L'acquisition des débits d'entrée dans les réservoirs est liée à beaucoup d'éléments, entre autres la précision des appareils de mesure, la bathymétrie du réservoir et l'effet des vagues sur les mesures prises. La calibration des modèles et le calcul des apports simulés ont été réalisés en utilisant des données d'entrée qui pourraient avoir des erreurs et imprécisions.

ii. La validité interne des résultats

Les résultats fournis ont été obtenus avec les données météorologiques validées à l'interne par HQ. Cette validation a été faite en comparant les séries météorologiques à d'autres séries météorologiques par l'utilisation de critères de statistique, de climatologique et hydrologique. Les conclusions proposent la mise en place d'une nouvelle série météorologique à cause de la mauvaise qualité de la série SPAN. Les données de neige ne sont pas toujours disponibles sur

tous les bassins. Par extrapolation, les données disponibles ont été reportées aux autres espaces n'ayant pas de données de neige. Au mieux des données disponibles et des conditions hydrologiques des systèmes hydriques analysés, les présents résultats reflètent les variations d'écoulement des débits d'eau dans le BV du système hydrique de Saint-Maurice.

9.3 Portée des résultats

iii. Réponse au besoin d'HQ

Le résultat obtenu provenant de l'application de la méthodologie globale du présent mémoire permet à HQ de reconstituer des séries d'apports historiques à un pas de temps journaliers en fonction de la qualité actuels des données d'entrée. L'analyse des apports simulés par rapport aux séries journalières disponibles illustre une qualité supérieure acquise. L'ensemble des systèmes hydriques d'HQ possède en majorité des données et des besoins semblables. L'approche utilisée pour désagréger les apports mensuels en apports journaliers du BV Beaumont pourrait évidemment être appliquée aux autres BV des systèmes hydriques d'HQ. Les résultats de la présente étude s'inscrivent dans le cadre de la gestion intégrée des réserves d'eau dans les réservoirs d'HQ. Elle fournit à HQ des informations hydrologiques nécessaires à la planification et gestion durable de ces systèmes hydriques. La méthode AHP a permis de qualifier la méthode la plus adéquate dans le cadre opérationnelle d'HQ. L'alternative HYDROTEL a été qualifiée d'un poids de 50% par rapport aux autres alternatives (HSAMI et Combinaison HSAMI-HYDROTEL).

iv. Contribution à la désagrégation des apports mensuels

La désagrégation des débits mensuels en débits journaliers est possible avec l'utilisation du modèle HYDROTEL. Cette méthode est assez robuste et conviviale, prend en compte la réalité hydrologique des bassins versants étudiés. En effet, un modèle HYDROTEL bien calibrée utilisant des données d'entrée de qualité (des données météorologiques et un modèle terrain provenant du modèle Physitel) est capable de simuler des apports historiques de débits de qualité. Avec des données météorologiques futures, le modèle HYDROTEL est aussi capable de fournir des ANR journaliers futurs.

Le présent mémoire contribue à donner une démarche fiable à HQ pour reconstituer les apports naturels réels historiques dans les réservoirs de ses systèmes hydriques. En effet, les séries d'apports journaliers historiques reconstituées ont une très grande importance car elles sont utilisées par d'autres chercheurs pour simuler des apports journaliers futurs d'une part et surtout par HQ pour la planification de sa production hydroélectrique d'autre part. L'approche proposée illustre la cohérence entre la météo-apport. Avec la météo du futur simulée dans les modèles de changements climatiques, les séries d'apports naturels futurs pourront être constituées. L'analyse des résultats des débits simulés, par rapport aux séries filtrées, calculées et harmonisées, montre que la méthode proposée permet d'atteindre directement les objectifs de reconstitution des séries journalières historiques de qualité. Désormais, il n'est plus nécessaire de filtrer, calculer ou harmoniser les séries existantes, il suffit simplement d'avoir une météo de bonne qualité, pour reconstituer des apports journaliers historiques de qualité.

9.4 Perspectives

Le modèle HYDROTEL devra être amélioré afin de prendre en compte d'autres types de données d'entrée comme Arcview, des données radar, etc. Les données mensuelles disponibles devront être validées et corrigées en fonction de la méthode d'acquisition de ces données. Les séries données météorologiques devront être raffinées, améliorées et même reconstituées. Une étude de sensibilité pourrait être menée pour déterminer l'impact de la grandeur des systèmes hydriques et des réservoirs sur les résultats obtenus.

9.5 Conclusion

Les résultats de cette analyse confirment que le modèle semi-distribué comme HYDROTEL fournit des résultats plus précis que le modèle global HSAMI. Dans le cadre opérationnel d'HQ, cette hypothèse vient d'être confirmée.

En fonction des résultats de la validation des données d'entrée utilisées dans cette étude, les résultats devront être interprétés avec assez de prudence.

L'approche proposée et développée ici demeure robuste pour la désagrégation des apports mensuels en apports journaliers.

CHAPITRE 10 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'approche de désagrégation des débits mensuels en débits journaliers a été appliquée sur le BV Beaumont du SH de Saint-Maurice. L'objectif était de désagréger les ANR mensuels disponibles en intégrant les aspects physiques et hydrologiques des BV, afin de reconstituer les séries d'ANR journaliers historiques. Différentes analyses de validation des données hydrométriques et météorologiques sur une période de 30 ans allant de 1985 à 2015 ont été réalisées.

Plusieurs études et hypothèses affirment que le modèle semi-distribué est plus précis que le modèle global. HYDROTEL est donc capable de mieux représenter les comportements hydrologiques de différents bassins. Cette information est confirmée par la présente étude dans le cadre opérationnel d'HQ, sur le BV Beaumont en considérant toutes les hypothèses et la qualité des données d'entrée.

L'analyse des débits simulés confirme que le modèle HYDROTEL représente mieux le comportement hydrologique des bassins versants des SH de Saint-Maurice. L'analyse des volumes cumulés montre que le volume cumulé simulé est légèrement supérieur à celui disponible de type harmonisé. Un écart assez mineur de moins de 5% est observé entre les séries harmonisées et simulées. La variation saisonnière des débits moyens simulés connaît une bonne cohérence avec les débits harmonisés. Sur une base annuelle, les débits simulés et harmonisés (observés) sont répartis avec la même tendance et la même variation. Au pas de temps journalier, les pics enregistrés avec les débits harmonisés sont plus élevés que les pics des débits simulés.

L'analyse généralisée des résultats montre que le modèle HYDROTEL représente conséquemment le comportement hydrologique des bassins, en fonction de la variation de la météo. La modélisation des paramètres physiques du terrain représente une partie importante qui dicte aussi la qualité des données simulées. Néanmoins la qualité de données mensuelles disponibles demeure un élément important expliquant l'écart entre la variabilité des volumes simulés et harmonisés.

HQ a besoin d'une base de données d'apports naturels réels au pas de temps journalier dans les réservoirs de ses systèmes hydriques des Outardes et de Saint-Maurice. La présente étude donne la démarche de solution pour reconstituer les apports historiques journaliers à partir des séries hydrométriques mensuelles.

Le présent mémoire contribue à donner une démarche fiable à HQ capable de reconstituer les apports naturels réels historiques journaliers. Les séries d'apports journaliers historiques reconstituées ont une très grande importance pour HQ pour la planification de sa production hydroélectrique. D'autres chercheurs peuvent utiliser les apports journaliers historiques reconstitués et même l'approche développée dans ce mémoire pour simuler des apports futurs et ainsi aider HQ à faire des prévisions de débit à long terme. L'approche proposée illustre la cohérence entre la météo et les apports. Avec la météo du futur simulée dans les modèles de changements climatiques, les séries d'apports naturels futurs pourront être calculées. L'analyse des débits simulés par rapport aux séries filtrées, calculées et harmonisées, montre que la méthode proposée permet d'atteindre directement les objectifs de reconstitution des séries journalières historiques de qualité. Désormais, HQ serait capable de reconstituer sa base de données d'apports réels historiques en fonction des séries de données météorologiques.

Les conclusions de cette étude sont restreintes au cadre opérationnel d'HQ. La qualité des données hydrométriques disponibles devra être améliorée en tenant compte de l'impact des vagues sur les mesures. Les séries de données météorologiques doivent être corrigées ou reconstituées. Des nouvelles données (météorologiques et hydrométriques) ainsi obtenues pourront être utilisées pour améliorer les séries simulées. Le modèle HYDROTEL pourrait être amélioré afin de prendre en compte des données radar de grande capacité capables de permettre la modélisation du comportement hydrologique des bassins avec plus de précision.

BIBLIOGRAPHIE

- Acharya, A. and Ryu, J. (2014). "Simple Method for Streamflow Disaggregation." J. Hydrol. Eng., 19(3), 509–519.
- Adeloye, A. J. and Nawaz, N. R. (1998), Assessing the Adequacy of Wright's Model Reconstructed Stream-Flow Data for Reservoir Storage-Yield-Reliability Analysis. Water and Environment Journal, 12: 130–138. doi: 10.1111/j.1747-6593.1998.tb00162.x
- Assani, A. A. (2004). Comparaison de la variabilité interannuelle des débits en fonction de régimes hydrologiques artificialisés dans un complexe de barrages sur la rivière Saint-Maurice (Québec, Canada). Bulletin de la Société géographique de Liège, 44, 87-96.
- Bayazit, M., & Aksoy, H. (2001). Using wavelets for data generation. Journal of Applied Statistics, 28(2), 157-166.
- Bennis, S., Côté, S., Berrada, F., Gagnon, L., & Kang, N. (1994). Logiciel de validation des données hydrométriques "ValiDeb". *Rapport technique final soumis à Hydro-Québec École de Technologie Supérieure, Montréal, Canada.*
- Bennis, S., Berrada, F., & Kang, N. (1997). Improving single-variable and multivariable techniques for estimating missing hydrological data. *Journal of Hydrology*, 191(1), 87-105.
- Beven, K. (2006). A manifesto for the equifinality thesis. *Journal of hydrology*, 320(1), 18-36.
- Dewey, J., & Rogers, M. L. (2012). *The public and its problems: An essay in political inquiry.* Penn State Press.
- Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V. K. (1994). Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of hydrology*, 158(3), 265-284.
- Fortin, J. P., Moussa, R., Bocquillon, C., & Villeneuve, J. P. (1995). HYDROTEL, un modèle hydrologique distribué pouvant bénéficier des données fournies par la télédétection et les systèmes d'information géographique. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 8(1), 97-124.
- Fortin, V. (2000). Le modèle météo-apport HSAMI : historique, théorie et application, Rapport de recherche, Institut de recherche d'Hydro-Québec, Varennes.

- Fortin, J. P., Duchesne, S., Bernier, M., Huang, K. H., & Villeneuve, J. P. (2007). HYDROTEL, un modèle hydrologique distribué pouvant générer des informations spatialisées détaillées très utiles pour la gestion de bassins versants de tailles diverses. *Actes des Journées Scientifiques Inter-Réseaux de l'Agence Universitaire de la Francophonie*, Hanoi, Viet Nam, November, 6-7.
- Gagnon, P., Freudiger, D., & Klein, I. (2012). Intégration de l'impact des changements climatiques (CC) dans la détermination des crues maximales probables (CMP) afin d'appuyer les usagers dans l'évaluation de la sécurité des barrages.
- Giroto, M., Cortés, G., Margulis, S. A., & Durand, M. (2014). Examining spatial and temporal variability in snow water equivalent using a 27 year reanalysis: Kern River watershed, Sierra Nevada. *Water Resources Research*, 50(8), 6713-6734.
- Güntner, A., Krol, M. S., Araújo, J. C. D., & Bronstert, A. (2004). Simple water balance modelling of surface reservoir systems in a large data-scarce semiarid region/Modélisation simple du bilan hydrologique de systèmes de réservoirs de surface dans une grande région semi-aride pauvre en données. *Hydrological sciences journal*, 49(5).
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1), 80-91.
- Haberlandt, U. (2014). Multivariate stochastic generation of daily streamflows considering climate change. In EGU General Assembly Conference Abstracts (Vol. 16, p. 9515).
- Hans von Storch, Heike Langenberg, and Frauke Feser, 2000: A Spectral Nudging Technique for Dynamical Downscaling Purposes. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 3664–3673.
- Hernández-Henríquez, M. A., Mlynowski, T. J., & Déry, S. J. (2010). Reconstructing the natural streamflow of a regulated river: A case study of La Grande Rivière, Québec, Canada. *Canadian Water Resources Journal*, 35(3), 301-316.
- Hirsch, R. M. (1979). An evaluation of some record reconstruction techniques. *Water resources research*, 15(6), 1781-1790.
- Hirsch, R. M. (1982). A comparison of four streamflow record extension techniques. *Water Resources Research*, 18(4), 1081-1088.

Hosseinpour, A., Dolcine, L., & Fuamba, M. (2014). Natural Flow Reconstructing Using Kalman Filter and Water Balance Based Methods (Part 2: Case Studies, Results and Discussion). *Journal of Hydrologic Engineering*.

Hosseinpour, A., Dolcine, L., & Fuamba, M. (2014). Natural Flow Reconstruction Using Kalman Filter and Water Balance–Based Methods I: Theory. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(12), 04014029.

Hughes, D. A., & Smakhtin, V. (1996). Daily flow time series patching or extension: a spatial interpolation approach based on flow duration curves. *Hydrological Sciences Journal*, 41(6), 851-871.

Hwang, S., & Graham, W. D. (2013). Development and comparative evaluation of a stochastic analog method to downscale daily GCM precipitation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(11), 4481-4502.

Hwang, S., & Graham, W. D. (2014). Assessment of Alternative Methods for Statistically Downscaling Daily GCM Precipitation Outputs to Simulate Regional Streamflow. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*.

Jeuland, M., Baker, J., Bartlett, R., & Lacombe, G. (2014). The costs of uncoordinated infrastructure management in multi-reservoir river basins. *Environmental Research Letters*, 9(10), 105006.

Kumar, D. N., Lall, U., & Petersen, M. R. (2000). Multisite disaggregation of monthly to daily streamflow. *Water Resources Research*, 36(7), 1823-1833.

LEBLANC, Y., LEGARE, G., LACASSE, K., PARENT, M. ET CAMPEAU, S. 2013. Caractérisation hydrogéologique du sud- ouest de la Mauricie. Rapport déposé au ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec. Département des sciences de l'environnement, Université du Québec à Trois-Rivières, 134 p., 15 annexes et 30 documents cartographiques (1:100 000).

Ludwig, R., Taschner, S., & Mauser, W. (2003). Modelling floods in the Ammer catchment: limitations and challenges with a coupled meteo-hydrological model approach. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 7(6), 833-847.

- Matalas, N. C. (1967), Mathematical assessment of synthetic hydrology, *Water Resour. Res.*, 3(4), 937–945, doi: 10.1029/WR003i004p00937.
- Montaseri, M., & Adeloye, A. J. (1999). Critical period of reservoir systems for planning purposes. *Journal of Hydrology*, 224(3), 115-136.
- MURPHY J., 1999. An evaluation of statistical and dynamical techniques for downscaling local climate. *J.Clim.*, 12, 2256–2284. DOI: 10.1175/1520-0442(1999)012<2256: AEOSAD>2.0.CO;2
- Ng, M. (2010). Multivariate non-stationary stochastic streamflow models for two urban watersheds (Order No. 1481046). Available from ProQuest Dissertations & Theses A&I; ProQuest Dissertations & Theses Full Text. (756745439). Retrieved from <http://search.proquest.com/docview/756745439?accountid=40695>
- Niu J, Sivakumar B (2013) Scale-dependent synthetic streamflow generation using a continuous wavelet transform. *Journal of Hydrology* 496:71–78
- Nowak, K., Prairie, J., Rajagopalan, B., & Lall, U. (2010). A nonparametric stochastic approach for multisite disaggregation of annual to daily streamflow. *Water Resources Research*, 46(8) doi:<http://dx.doi.org/10.1029/2009WR008530>
- Obled, C. (1990). Hydrological modeling in regions of rugged relief. *Hydrology in Mountainous Regions. I-Hydrological Measurements*, 599-613.
- Olsson, J. A., & Anderson, L. (2007). Possibilities and problems with the use of models as a communication tool in water resource management. *Integrated Assessment of Water Resources and Global Change* (pp. 97-110). Springer Netherlands.
- Peterson, T., Folland, C., Gruza, G., Hogg, W., Mokssit, A., & Plummer, N. (2001). *Report on the activities of the working group on climate change detection and related rapporteurs*. Geneva: World Meteorological Organization.
- Prairie, J., Rajagopalan, B., Lall, U., & Fulp, T. (2007). A stochastic nonparametric technique for space-time disaggregation of streamflows. *Water Resources Research*, 43(3).
- Remesan, R., & Mathew, J. (2015). Hydroinformatics and Data-Based Modelling Issues in Hydrology. In *Hydrological Data Driven Modelling* (pp. 19-39). Springer International Publishing.

- Rissons, M., & Bocquillon, C. (1996). Un modèle hydrologique spatialisé SIG, base de données et mécanismes hydrologiques. IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences, 235, 461-468.
- Roy, M. (2014). *Evaluation de l'impact du vent et des manoeuvres hydrauliques sur le calcul des apports naturels par bilan hydrique pour un reservoir hydroelectrique*(Order No. 1690701). Available from Dissertations & Theses @ Ecole Polytechnique de Montreal; ProQuest Dissertations & Theses A&I; ProQuest Dissertations & Theses Global. (1666392595). Retrieved from <http://search.proquest.com/docview/1666392595?accountid=40695>
- Roy, R., Gauthier, R., & Héту, M. (1992). Hydrometeorological data quality improvement by implementing an autonomous acquisition network in barren areas.
- Saaty, T. L. (1971). On polynomials and crossing numbers of complete graphs.*Journal of Combinatorial Theory, Series A*, 10(2), 183-184.
- Shiau, J. T., & Lee, H. C. 2005. Derivation of optimal hedging rules for a water-supply reservoir through compromise programming. *Water resources management*, 19(2), 111-132.
- Shih, D. S., Liau, J. M., & Yeh, G. T. (2011). Model Assessments of Precipitation with a Unified Regional Circulation Rainfall and Hydrological Watershed Model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(1), 43-54.
- Sivakumar, B., Wallender, W. W., Puente, C. E., & Islam, M. N. (2004). Streamflow disaggregation: a nonlinear deterministic approach. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11(3), 383-392.
- Srinivas, V. V., & Srinivasan, K.(2006). Hybrid matched-block bootstrap for stochastic simulation of multiseason streamflows. *Journal of Hydrology*, 329(1), 1-15. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.01.023
- Turcotte, R., Lacombe, P., Dimnik, C., & Villeneuve, J. P. 2004. Prévision hydrologique distribuée pour la gestion des barrages publics du Québec. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31(2), 308-320.
- Turcotte, R., Rousseau, A. N., Fortin, J. P., & Villeneuve, J. P. 2003. A process-oriented, multiple-objective calibration strategy accounting for model structure. *Water Science and Application*, 6, 153-163.

Turcotte, R., Rousseau, A. N., Fortin, J. P., and Villeneuve, J. P. 2003: “Development of a process-oriented, multiple-objective, hydrological calibration strategy accounting for model structure”, *Advances in calibration of watershed models. Water science and application* 6, Q.

Tejada-Guibert, J. A., Johnson, S. A., & Stedinger, J. R. (1993). Comparison of two approaches for implementing multireservoir operating policies derived using stochastic dynamic programming. *Water Resources Research*, 29(12), 3969-3980.

Wang W, Hu S, Li Y (2011) Wavelet transform for synthetic generation of daily streamflow. *Water Resources Management* 25(1):41–57

Wang, H. and Fu, X. (2014), Utilization of climate information and soil moisture estimates to provide monthly and sub-monthly streamflow forecasts. *Int. J. Climatol.*, 34: 3515–3527. doi: 10.1002/joc.3924

Wang, H., Brill, E. D., Ranjithan, R. S., & Sankarasubramanian, A. (2015). A Framework for Incorporating Ecological Releases in Single Reservoir Operation. *Advances in Water Resources*.

William H. Klein and Harry R. Glahn, 1974: Forecasting Local Weather by Means of Model Output Statistics. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 55, 1217–1227. doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(1974\)055<1217:FLWBMO>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(1974)055<1217:FLWBMO>2.0.CO;2)

Yang, Y-C. E. and Cai X. (2011). “Reservoir reoperation for fish ecosystem restoration using Inflows — A case study of Lake Shelbyville.” *J. Water Resour. Plng. And Mgmt.*, doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000139

You, G., Thum, B., & Lin, F. (2014). The examination of reproducibility in hydro-ecological characteristics by daily synthetic flow models. *JOURNAL OF HYDROLOGY*, 511, 904-919. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.02.047

Yurekli, K., Kurunc, A., & Ozturk, F. (2005). Application of linear stochastic models to monthly flow data of Kelkit Stream. *Ecological modelling*, 183(1), 67-75.

ANNEXE A - PROCESSUS SIMULÉS ET ALGORITHMES UTILISÉS POUR LES SIMULATIONS HYDROLOGIQUES

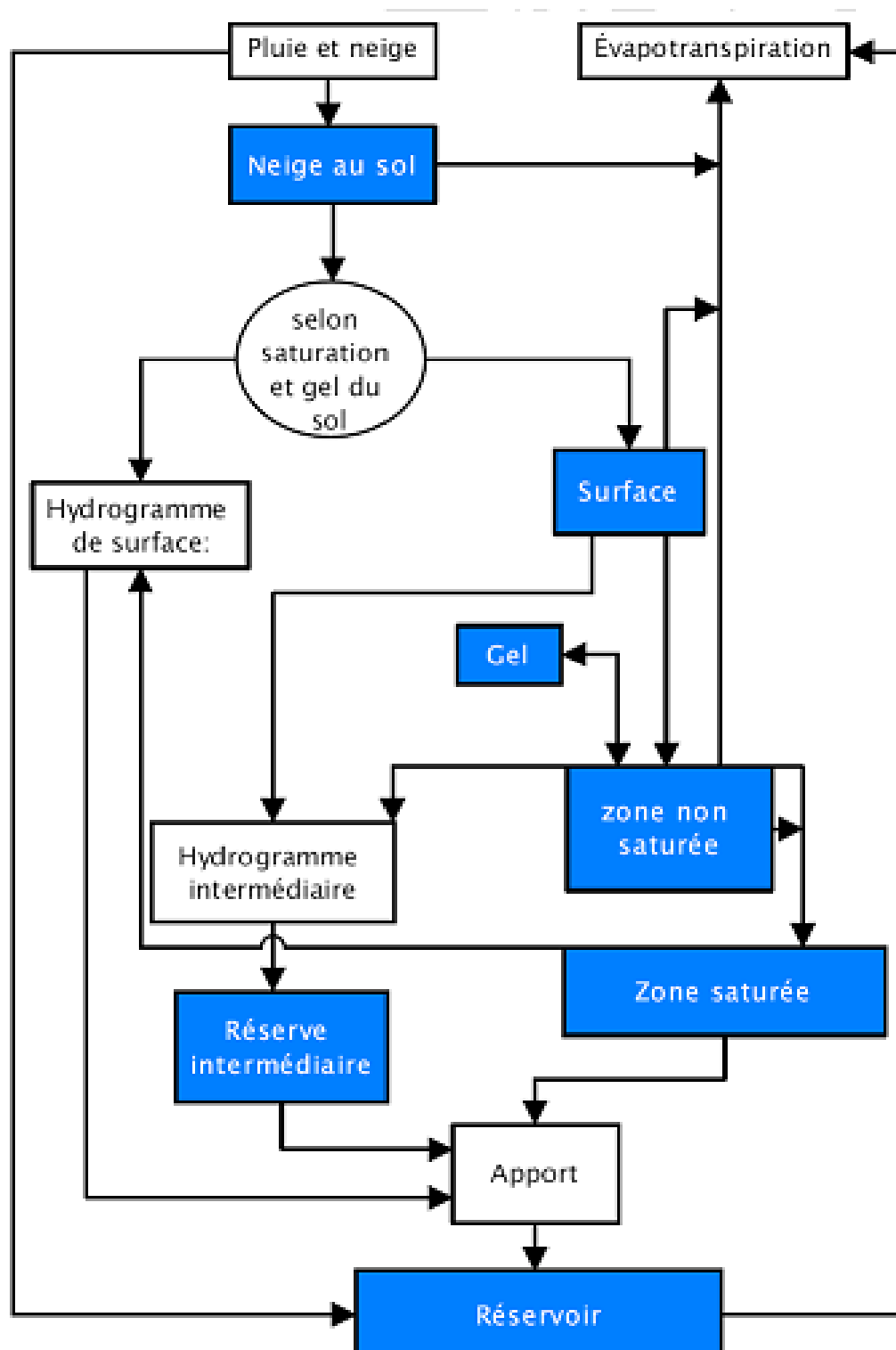
(Source: Gagnon, Freudiger, et Klein, 2012).

Processus hydrologiques	Algorithmes disponibles
1. Interpolation des données météorologiques	<i>Polygones de Thiessen</i> Moyenne pondérée des trois stations les plus rapprochées**
2. Évolution du couvert nival	Méthode mixte (degrés-jours) - (bilan énergétique)** C'est le seul algorithme présent dans HYDROTEL pour simuler l'évolution du couvert nival en fonction de l'accumulation et la fonte des précipitations solides
3.Évapotranspiration potentielle (ETP)	Thornthwaite (1948)** Cette équation a été utilisée pour représenter l'évaporation, car elle est moins exigeante en données d'entrée. $E = \left(\frac{16.2}{30.4}\right) * (Lj) * \left(\frac{10T}{I}\right)^A$ avec E : évapotranspiration potentielle de Thornthwaite (mm/j); Lj : coefficient d'ajustement lié à la latitude et la longueur du jour; T : température moyenne journalière de l'air sur l'UHRH (°C); I : indice thermique de Thornthwaite; A : exposant déterminé à partir de l'indice thermique I. <i>Hydro-Québec</i> <i>Linacre (1977)</i> <i>Penman-Monteith [Monteith 1965]</i> <i>Priestley-Taylor (1972)</i>
4. Bilan d'eau vertical	Bilan vertical en trois couches (BV3C)** Cet algorithme prenant en compte une première couche affectée par l'évaporation de sol nu, contrôlant le ruissellement. Une seconde couche de transition entre la première et la troisième couche qui permet des écoulements retardés dans la couche supérieure du sol. En fin, la troisième couche contrôlant le débit de base ou de nappe. <i>CEQUEAU</i> Ce modèle hydrologique est développé à l'INRS par le professeur honoraire Guy Morin et son équipe. Il s'agit d'un modèle matriciel déterministe d'usage souple, qui prend en compte les caractéristiques physiques des bassins versants ainsi que leurs variations dans l'espace et dans le temps. il permet de simuler le profil vertical du déplacement de l'eau dans le sol.
5. Écoulement sur la partie terrestre du bassin	Onde cinématique** ce module prend en compte l'écoulement approximatif des gouttes d'eau provenant de la fonte ou des précipitations liquides jusqu'au réseau hydrographique avec le coefficient de Manning, etc.
6. Écoulement par le réseau hydrographique (dans les tronçons de rivières)	Onde cinématique** <i>Onde diffusante</i>

** Algorithmes utilisés dans le cadre de cette étude

ANNEXE B - SCHÉMA DU MODÈLE CONCEPTUEL HSAMI

(Source: Fortin, 2000)



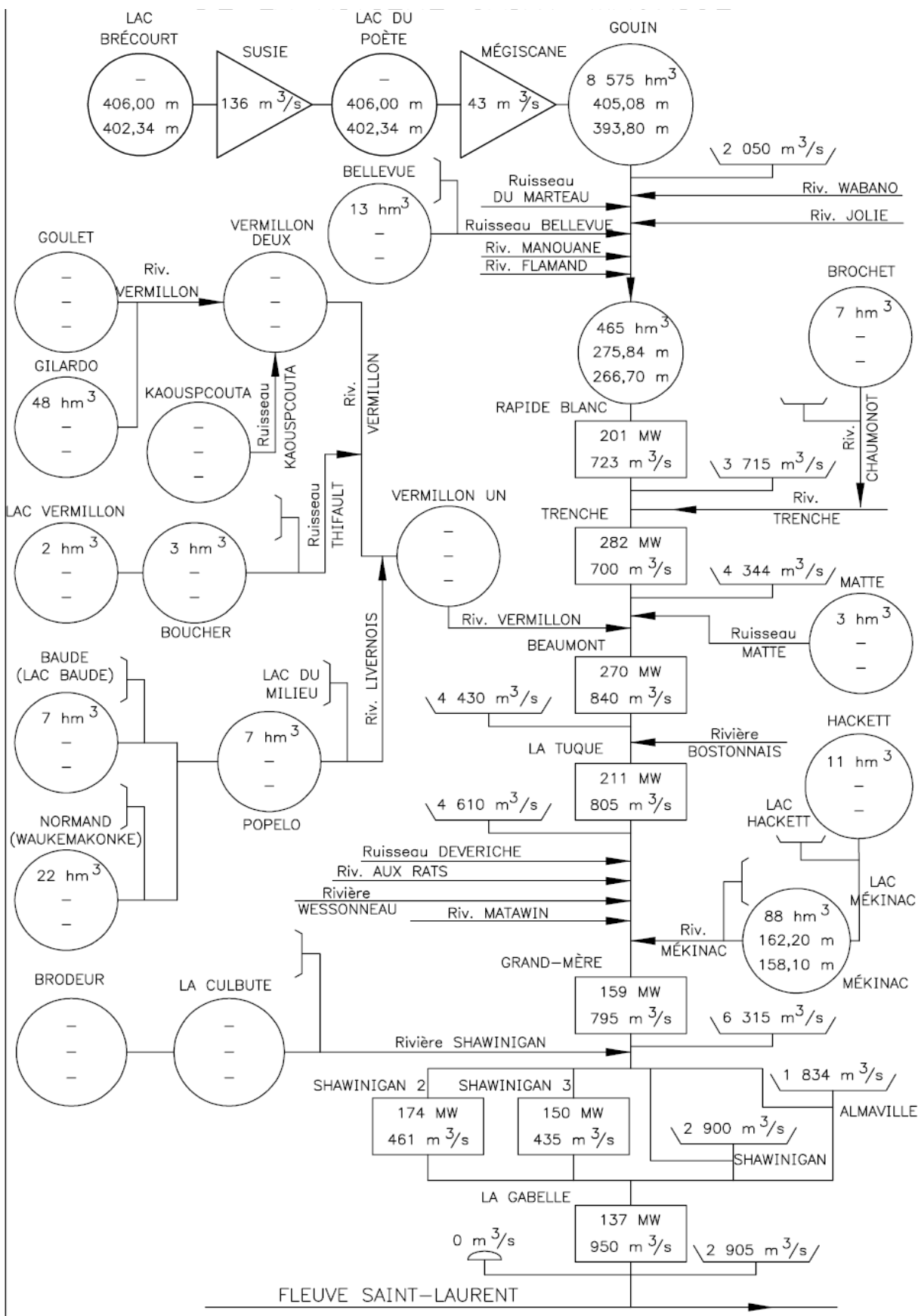
ANNEXE C - DESCRIPTION DES 23 PARAMÈTRES DU MODÈLE HSAMI

(Source: Fortin, 2000)

Paramètres liés à l'évapotranspiration	
efficacite_evapo_ete	facteur multipliant l'ETP permettant d'estimer l'ETR en été
efficacite_evapo_hiver	facteur multipliant <i>efficacite_evapo_ete</i> *ETP permettant d'estimer l'ETR en hiver
Paramètres liés à la fonte de neige	
taux_fonte_jour (cm/ΔC/jour)	taux de fonte du couvert nival, en cm/jour, pour chaque degré Celcius d'écart entre la température maximale et le seuil <i>temp_fonte_jour</i>
taux_fonte_nuit (cm/ΔC/jour)	taux de fonte du couvert nival, en cm/jour, pour chaque degré Celcius d'écart entre la température minimale et le seuil <i>temp_fonte_nuit</i>
temp_fonte_jour (C)	seuil de température maximale à partir duquel le couvert de neige peut fondre
temp_fonte_nuit (C)	seuil de température minimale à partir duquel la fonte du couvert de neige est accélérée
temp_ref_pluie (C)	température de référence par rapport à laquelle on calcule la chaleur apportée par la pluie au couvert nival
effet_redoux_sur_aire_enneigee	paramètre empirique utilisé pour relier les variables d'état <i>neige_au_sol_totale</i> et <i>fonte_totale</i> à la proportion du bassin couvert par de la neige
Paramètres liés à l'estimation du ruissellement de surface	
effet_gel	paramètre empirique utilisé pour relier l'écart entre les variables d'état <i>gel</i> et <i>degel</i> à la proportion de l'eau de fonte qui ruisselle en surface
effet_sol (cm)	quantité de pluie sur 24h nécessaire pour que 50% de cette eau ruisselle en surface lorsque le sol est complètement sec (i.e. la réserve <i>sol</i> est égale à zéro)
seuil_min (cm)	quantité de pluie sur 24h nécessaire pour que 50% de cette eau ruisselle en surface lorsque le sol est saturé (i.e. la réserve <i>sol</i> est égale à <i>sol_max</i>)
Paramètres liés à l'écoulement vertical de l'eau dans le sol	
sol_min (cm)	quantité d'eau dans la zone non-saturée qui ne peut s'écouler par gravité
sol_max (cm)	quantité maximale d'eau que peut contenir la zone non-saturée du sol
nappe_max (cm)	quantité maximale d'eau que peut contenir l'aquifère avant de générer un ruissellement de surface
portion_ruissellement_surface	proportion de l'eau en surface qui ruisselle via l'hydrogramme intermédiaire au lieu de cheminer à travers la colonne de sol
portion_ruissellement_sol_max	proportion de l'eau qui ruisselle via l'hydrogramme intermédiaire lorsque la réserve non-saturée déborde (le reste est acheminé vers la nappe)
taux_vidange_sol_min (24h-1)	taux de vidange de la zone non-saturée vers la nappe
taux_vidange_nappe (24h-1)	taux de vidange de la nappe, cette vidange constituant le débit de base
Paramètres liés à l'écoulement horizontal de l'eau vers l'exutoire	
taux_vidange_inter (24h-1)	taux de vidange de la réserve intermédiaire, cette vidange constituant l'apport intermédiaire
mode_hydrogramme_surface (jour)	pointe de l'hydrogramme unitaire de surface
forme_hydrogramme_surface	paramètre de forme de l'hydrogramme de surface (selon une fonction de distribution gamma)
mode_hydrogramme_inter (jour)	pointe de l'hydrogramme intermédiaire
forme_hydrogramme_inter	paramètre de forme de l'hydrogramme de surface (selon une fonction de distribution gamma)

ANNEXE D - SCHÉMA DU SH DE SAINT-MAURICE

(Source: Hydro-Québec 1994)



ANNEXE E - PRINCIPAUX INDICES CLIMATIQUES (ETCCDMI)

(Source: Hydro-Québec)

ID	Indicator name	Définitions	Units
FD0	Frost days	Annual count when TN(daily minimum)<0°C	Days
SU25	Summer days	Annual count when TX(daily maximum)>25°C	Days
ID0	Ice days	Annual count when TX(daily maximum)<0°C	Days
TR20	Tropical nights	Annual count when TN(daily minimum)>20°C	Days
GSL	Growing season Length	Annual (1st Jan to 31st Dec in NH, 1st July to 30th June in SH) count between first span of at least 6 days with TG>5°C and first span after July 1 (January 1 in SH) of 6 days with TG<5°C	Days
TXx	Max Tmax	Monthly maximum value of daily maximum temp	°C
TNx	Max Tmin	Monthly maximum value of daily minimum temp	°C
TXn	Min Tmax	Monthly minimum value of daily maximum temp	°C
TNn	Min Tmin	Monthly minimum value of daily minimum temp	°C
TN10p	Cool nights	Percentage of days when TN<10th percentile	Days
TX10p	Cool days	Percentage of days when TX<10th percentile	Days
TN90p	Warm nights	Percentage of days when TN>90th percentile	Days
TX90p	Warm days	Percentage of days when TX>90th percentile	Days
WSDI	Warm spell duration indicator	Annual count of days with at least 6 consecutive days when TX>90th percentile	Days
CSDI	Cold spell duration indicator	Annual count of days with at least 6 consecutive days when TN<10th percentile	Days
DTR	Diurnal temperature range	Monthly mean difference between TX and TN	°C
RX1day	Max 1-day precipitation amount	Monthly maximum 1-day precipitation	Mm
Rx5day	Max 5-day precipitation amount	Monthly maximum consecutive 5-day precipitation	Mm
SDII	Simple daily intensity index	Annual total precipitation divided by the number of wet days (defined as PRCP>=1.0mm) in the year	Mm/day
R10	Number of heavy precipitation days	Annual count of days when PRCP>=10mm	Days
R20	Number of very heavy precipitation days	Annual count of days when PRCP>=20mm	Days
Rnn	Number of days above nn mm	Annual count of days when PRCP>=nn mm, nn is user defined threshold	Days
CDD	Consecutive dry days	Maximum number of consecutive days with RR<1mm	Days
CWD	Consecutive wet days	Maximum number of consecutive days with RR>=1mm	Days
R95p	Very wet days	Annual total PRCP when RR>95th percentile	Mm
R99p	Extremely wet days	Annual total PRCP when RR>99th percentile	mm
PRCPT OT	Annual total wet-day precipitation	Annual total PRCP in wet days (RR>=1mm)	mm

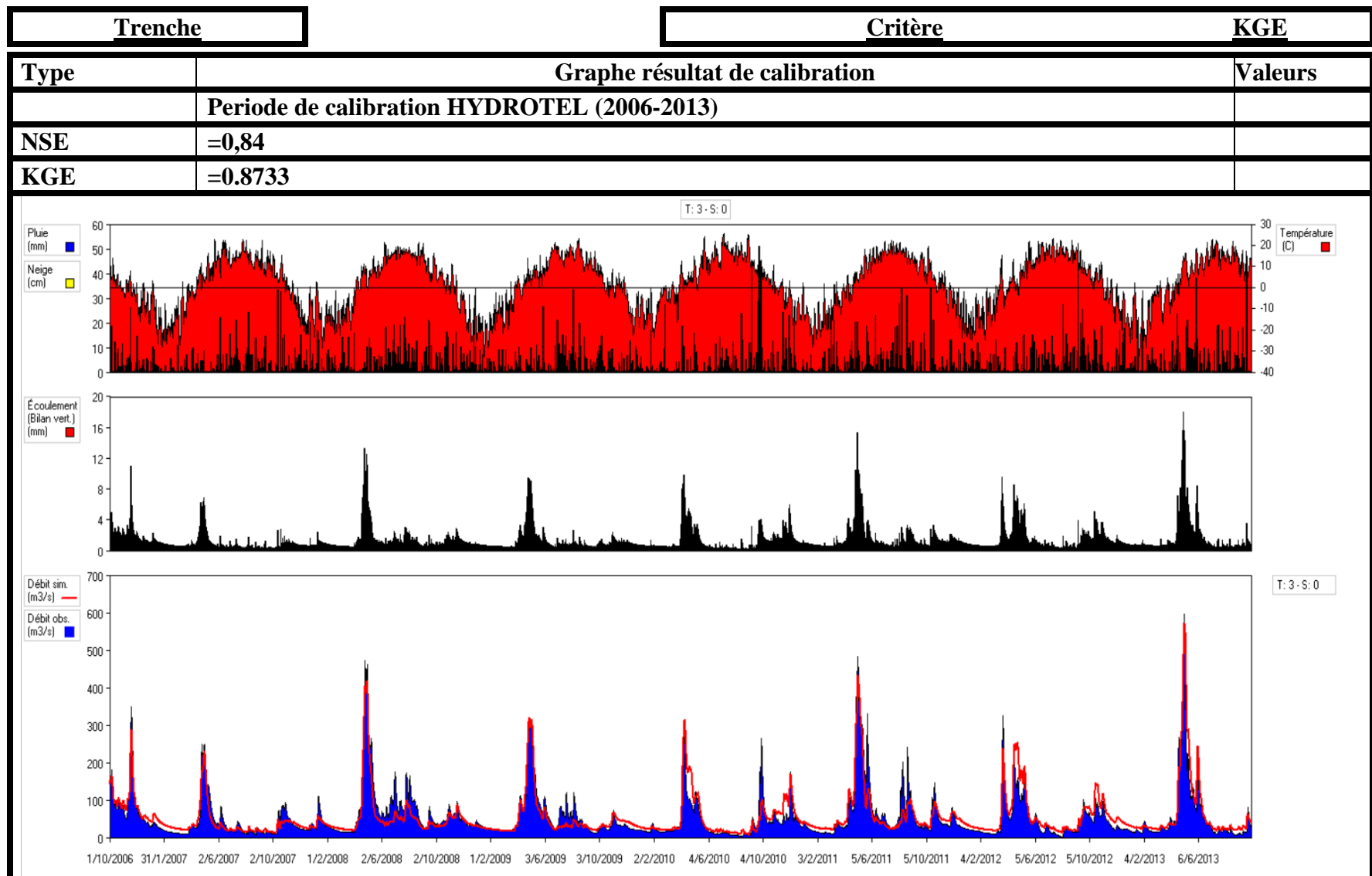
**ANNEXE F - RAPPORT D'ANALYSE DES DONNÉES HYDROMETRIQUES_
SH DES OUTARDES**

**ANNEXE G – RAPPORT D'ANALYSE DES DONNÉES
HYDROMETRIQUES _SH DES OUTARDES**

ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES APPORTS DEPUIS LA MISE EN EAU DES INSTALLATIONS

[illegible]

**ANNEXE H - RESULTATS DE LA CALIBRATION DU MODELE
HYDROTEL**



ANNEXE I - RESULTATS DE LA CALIBRATION DU MODELE HSAMI

Gouin

Grand-Mère

Rapide-Blanc a C et Gouin

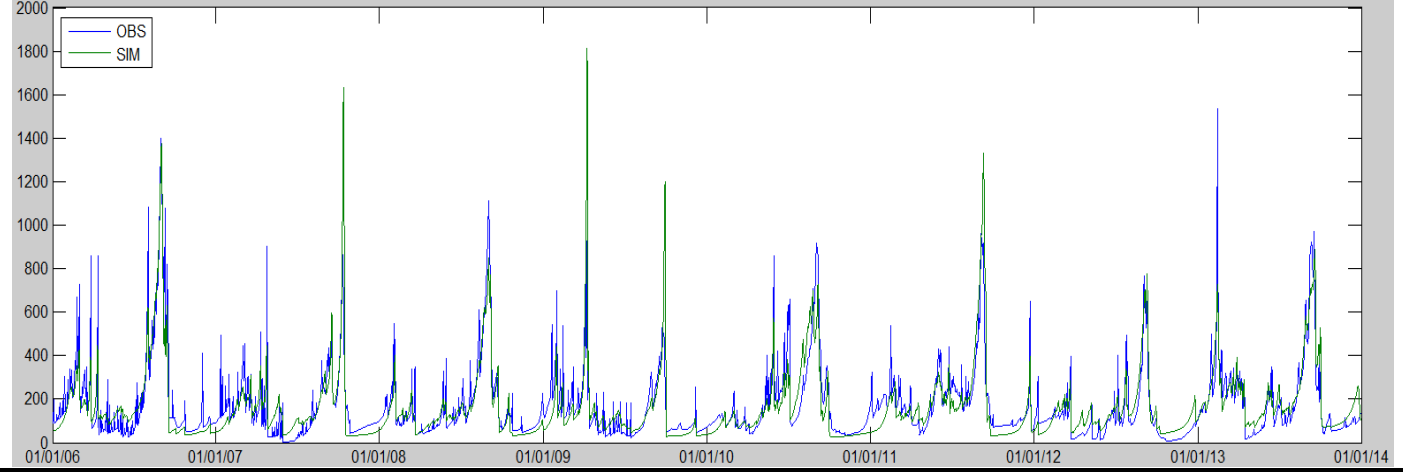
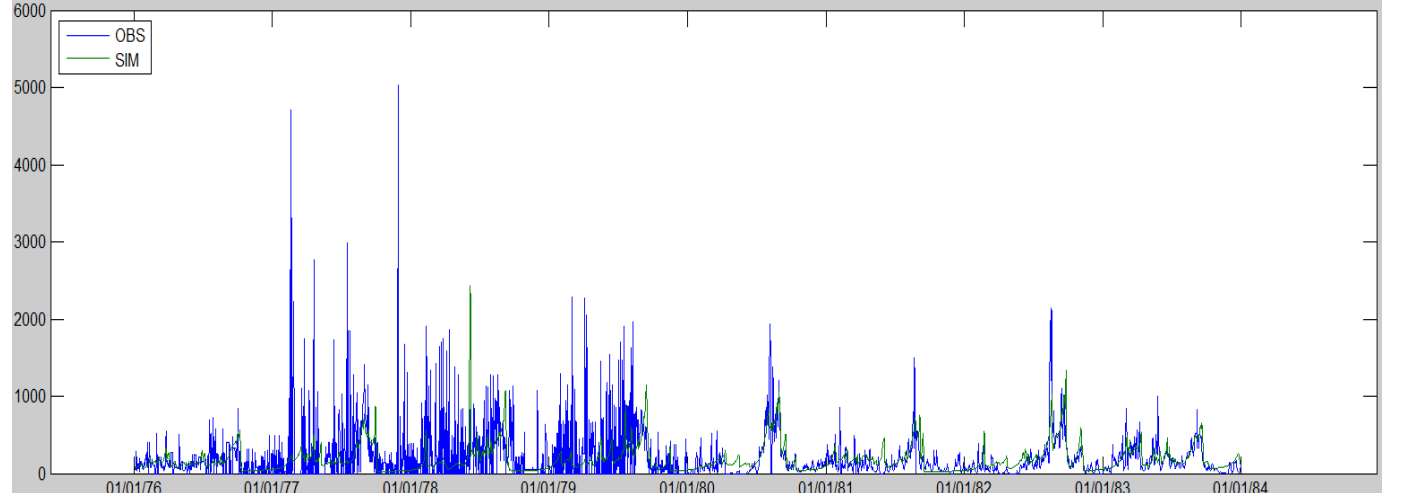
La Tuque

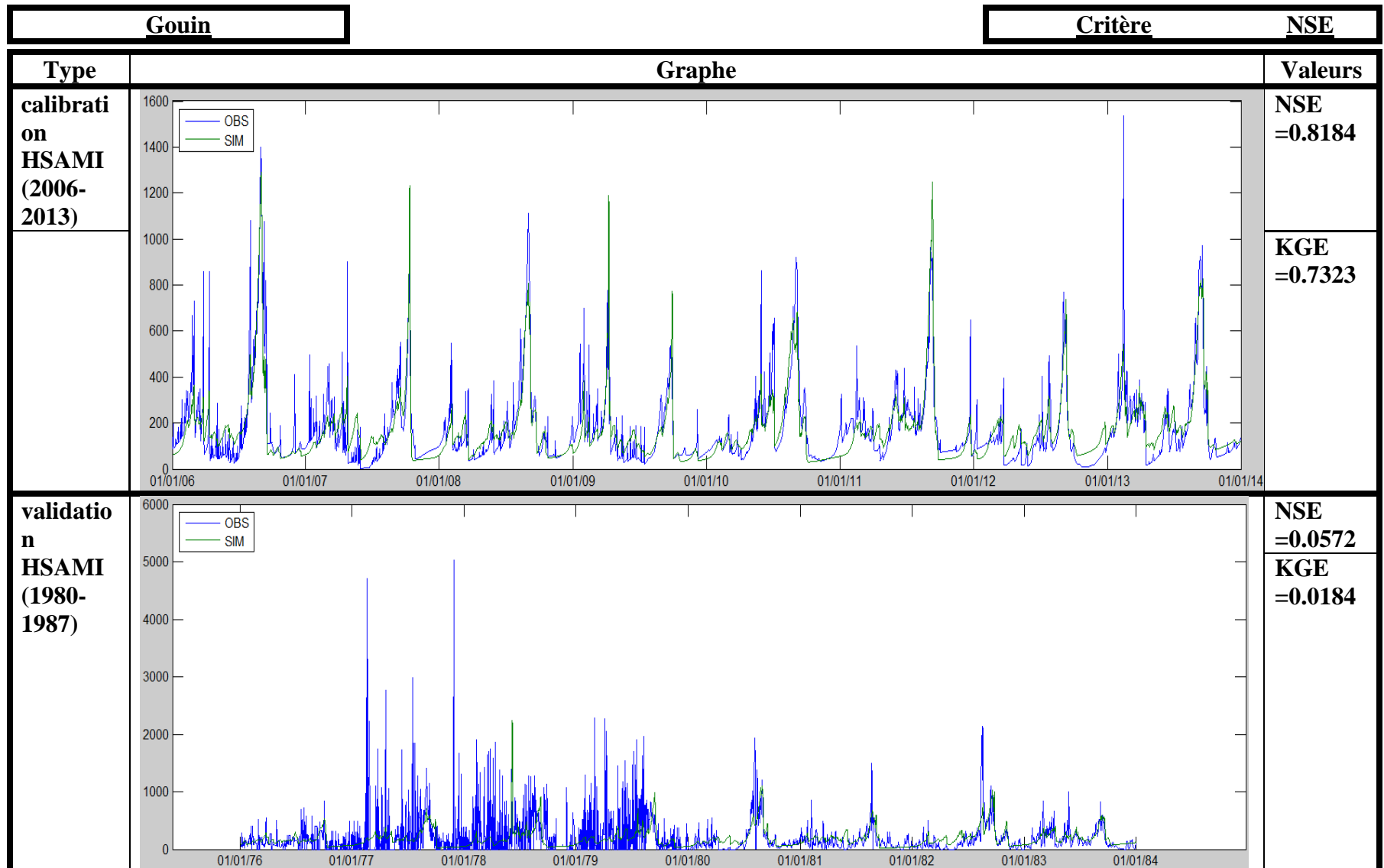
Manouane A-B-C

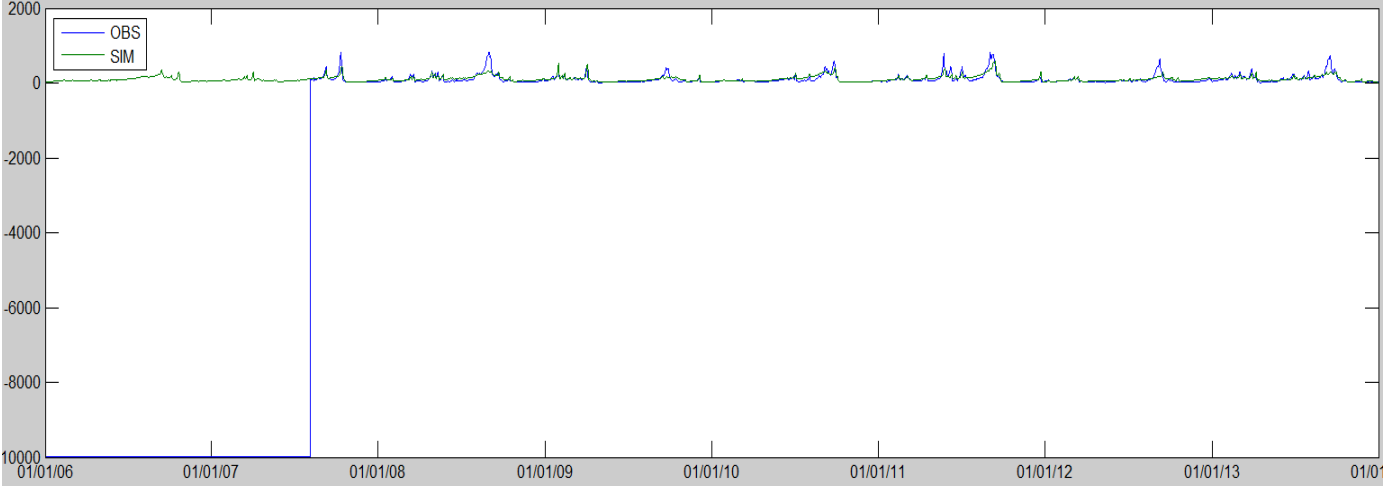
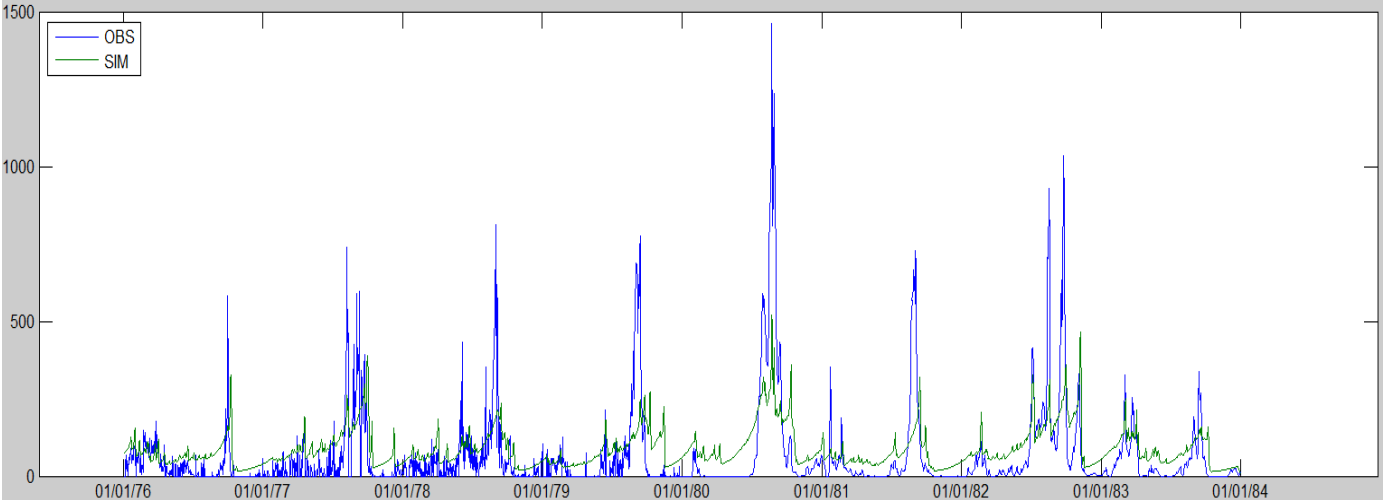
Shawinigan et La Gabelle

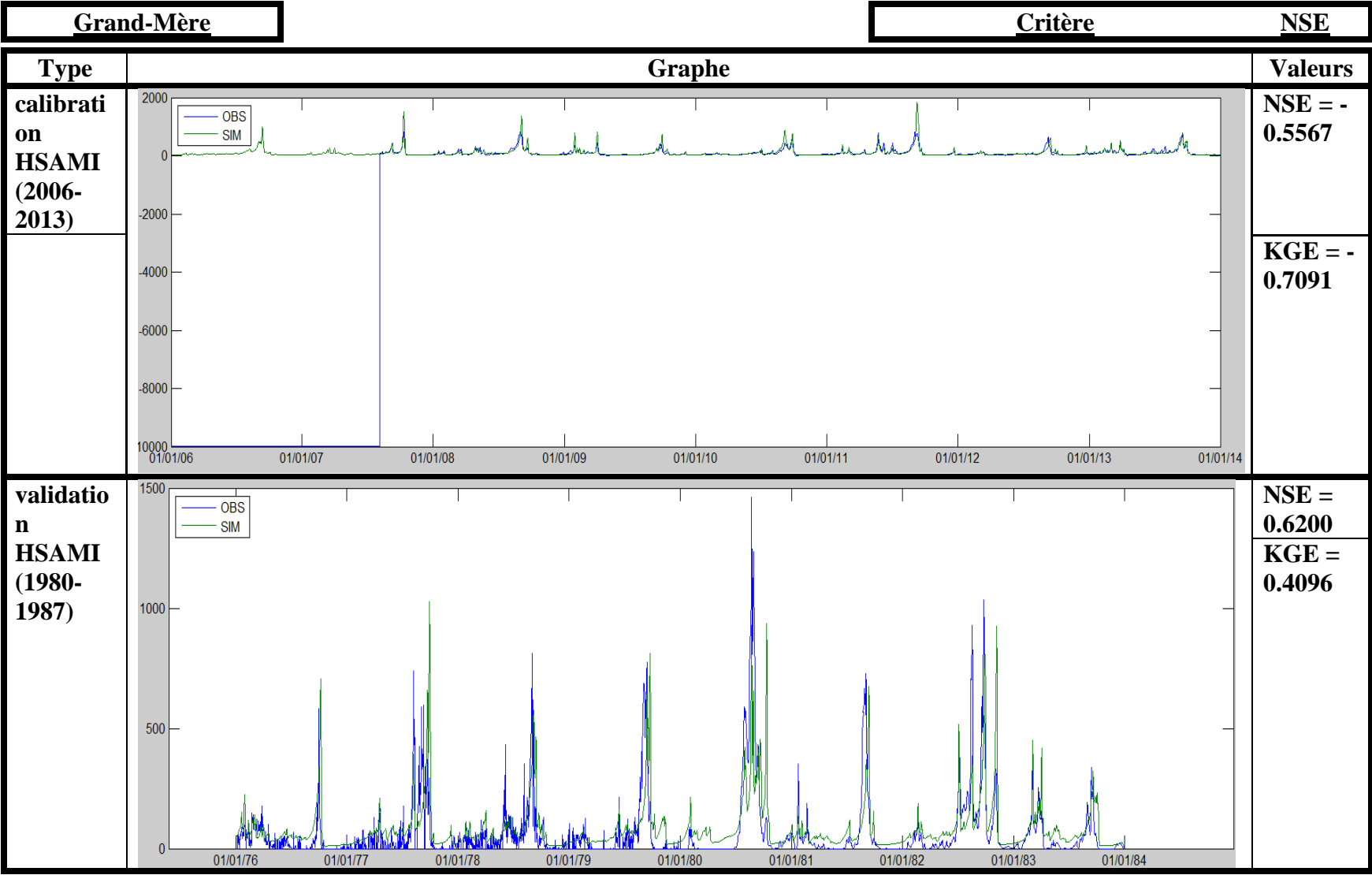
Taureau

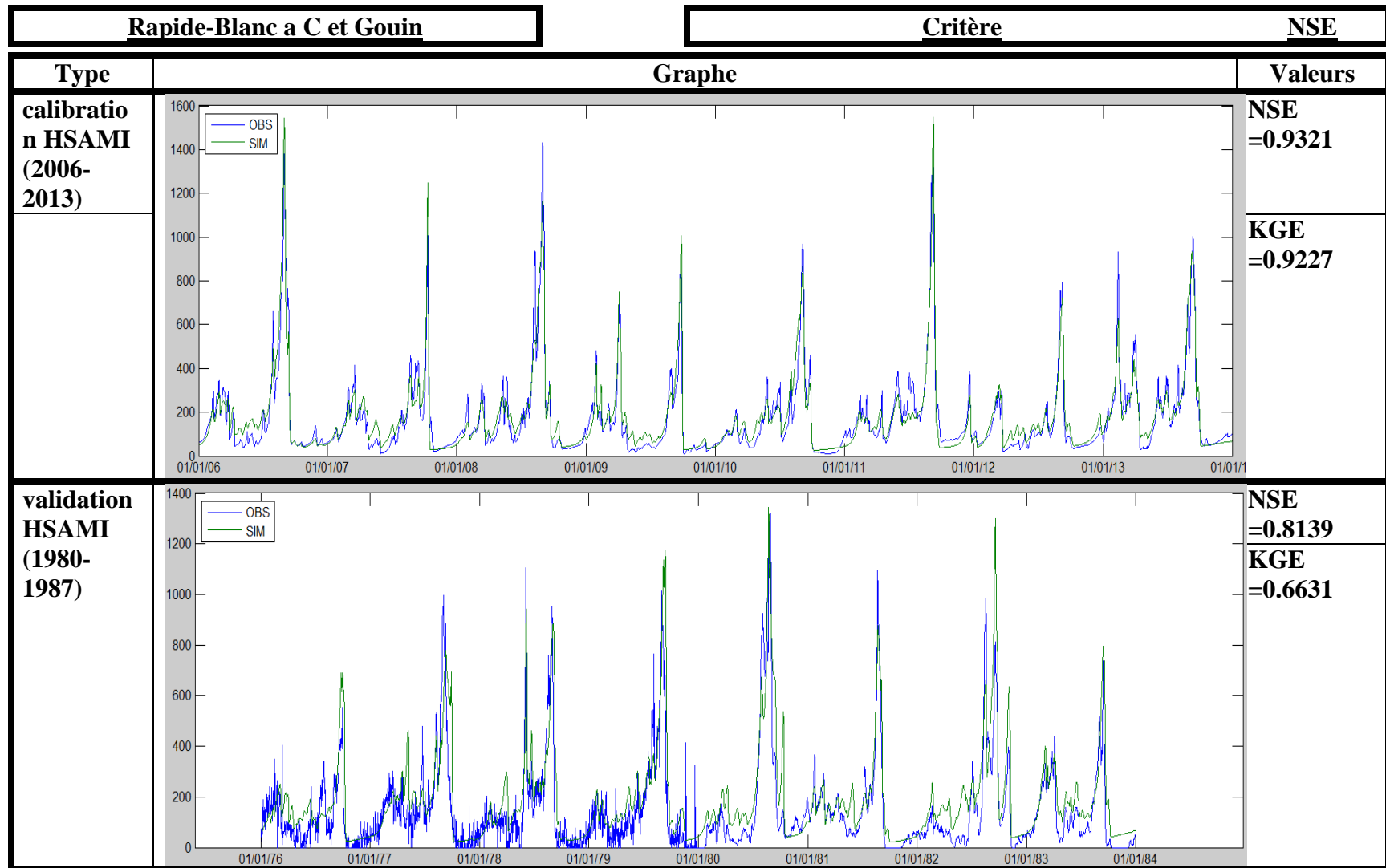
Trenche

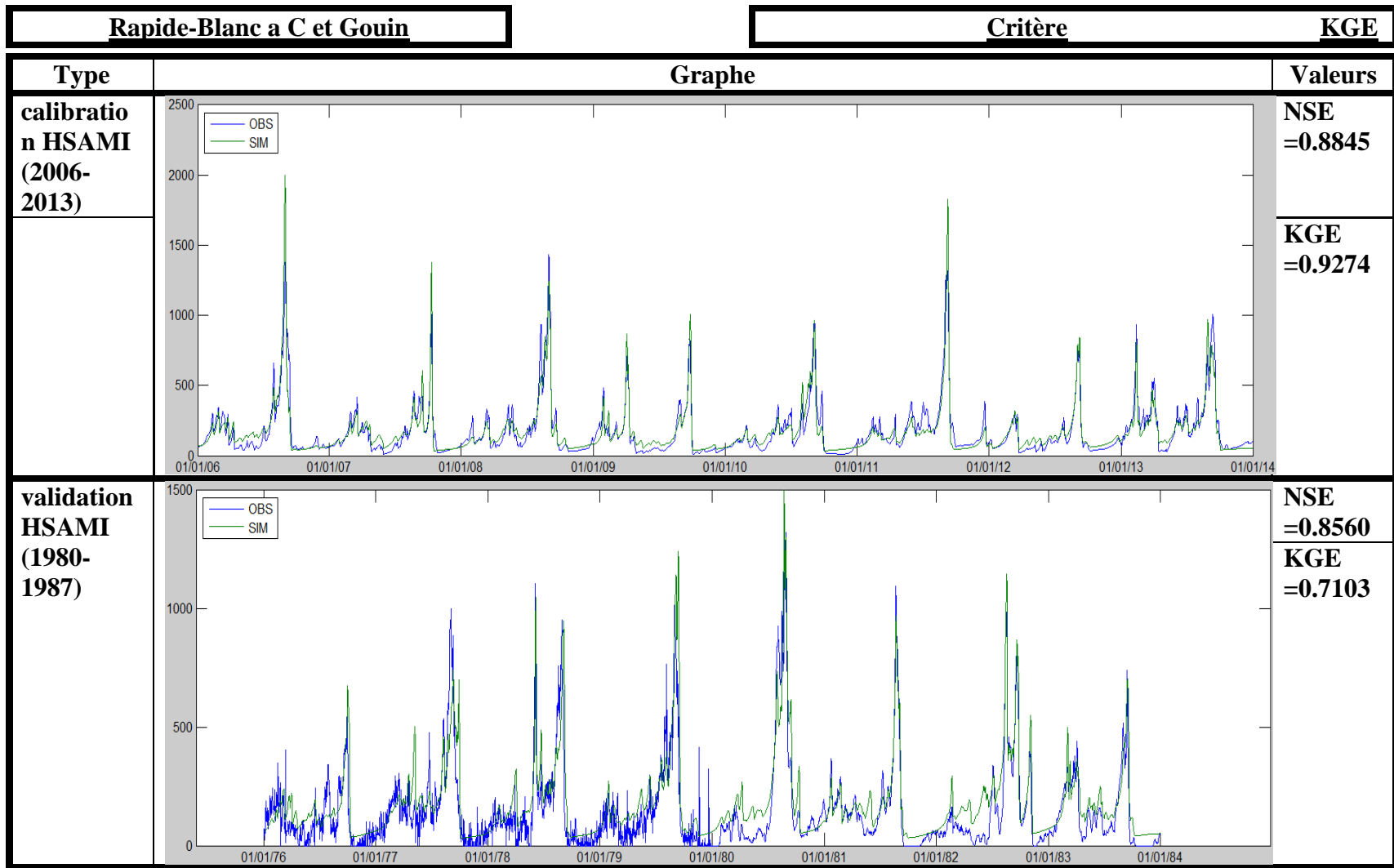
Gouin	Critère		KGE
Type	Graphe		Valeurs
calibration HSAMI (2006- 2013)			NSE =0.7914
			KGE =0.8597
validation HSAMI (1980- 1987)			NSE =0.0763
			KGE =0.0720

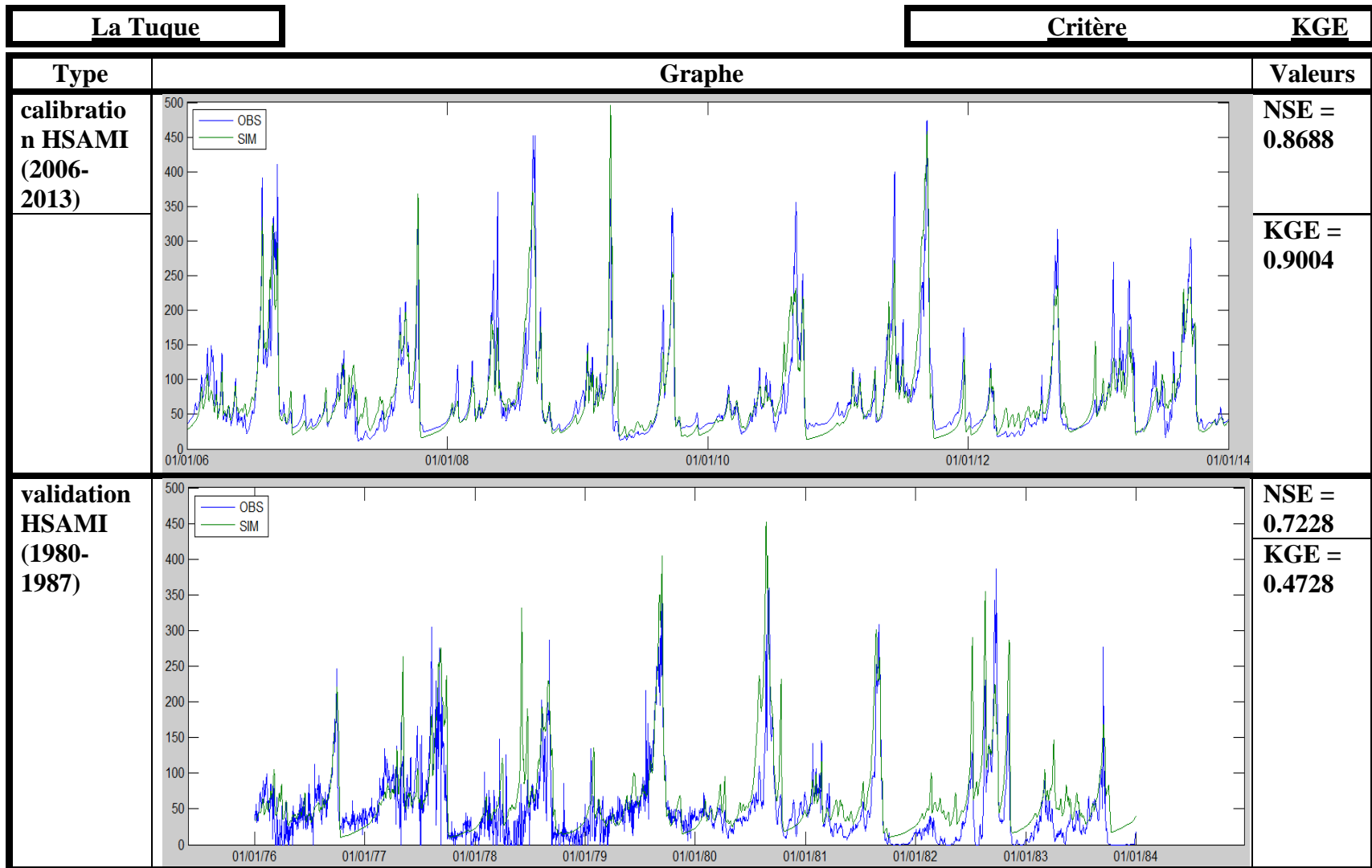


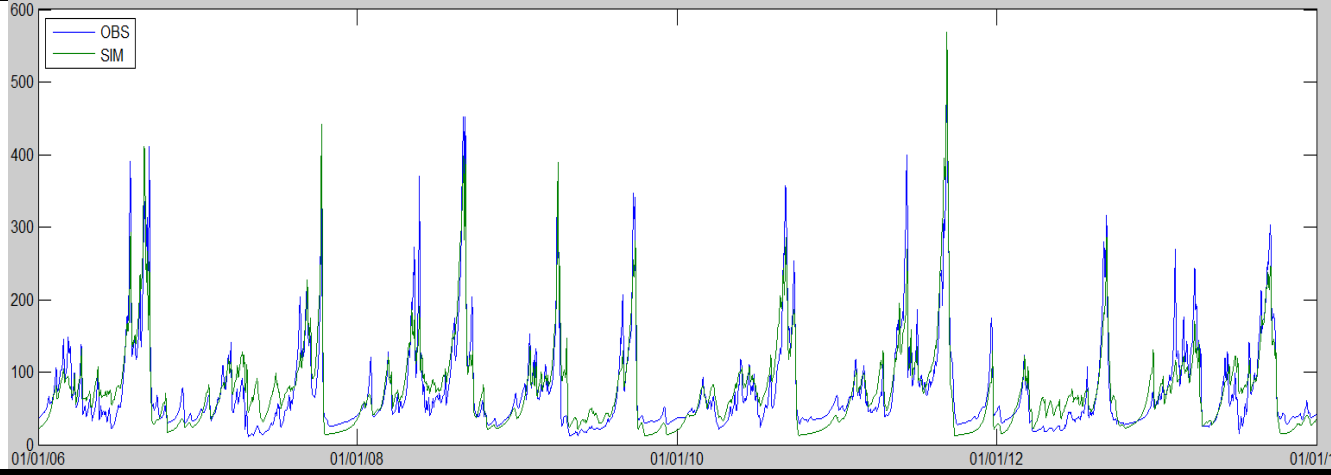
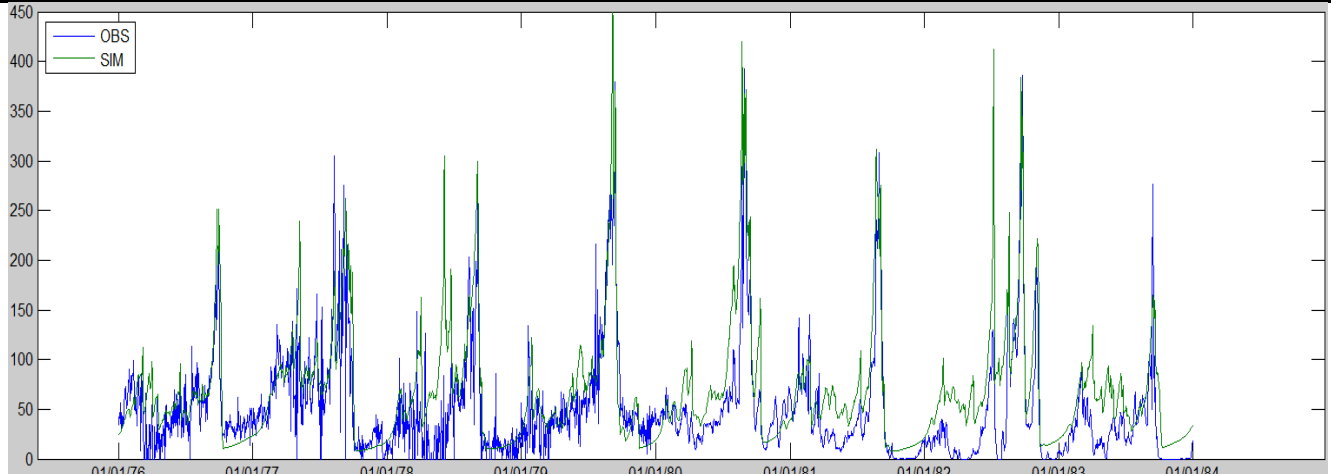
Grand-Mère		Critère	KGE
Type	Graphe	Valeurs	
calibration on HSAMI (2006- 2013)		NSE = - 0.5590	
		KGE = - 0.6869	
validation on HSAMI (1980- 1987)		NSE =0.4741	
		KGE =0.0628	

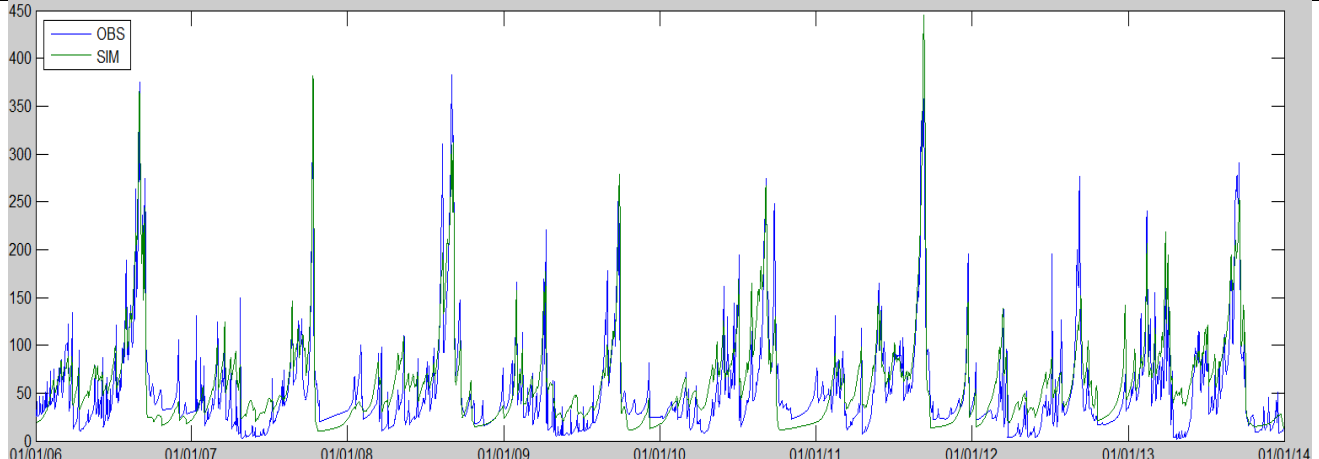
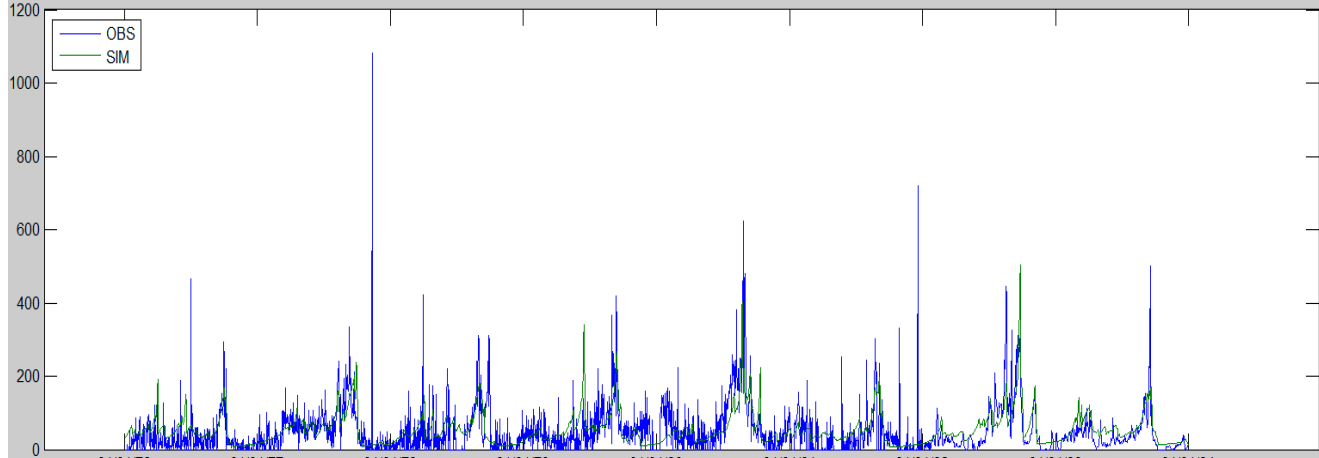


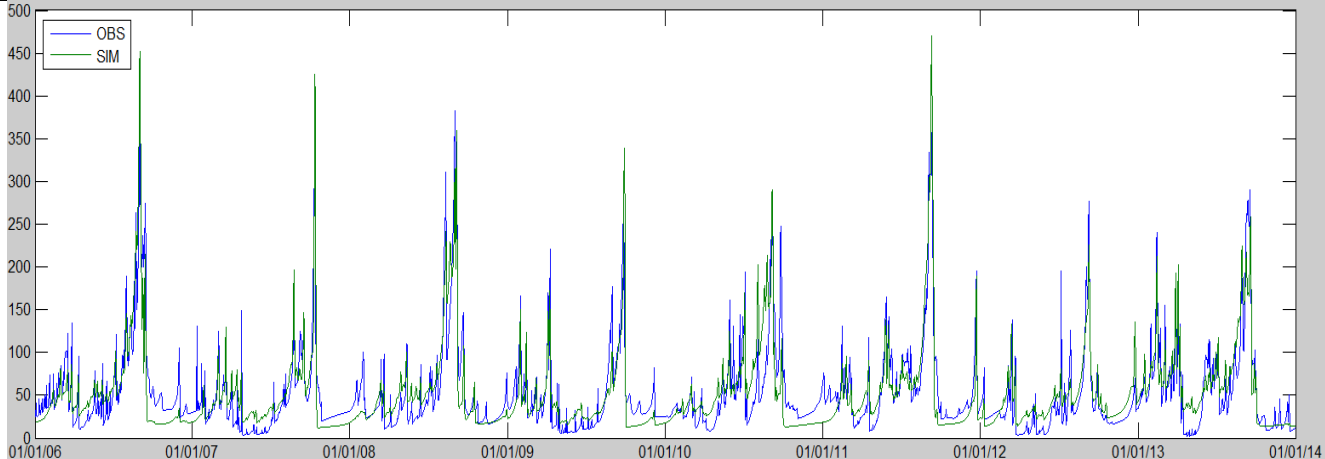
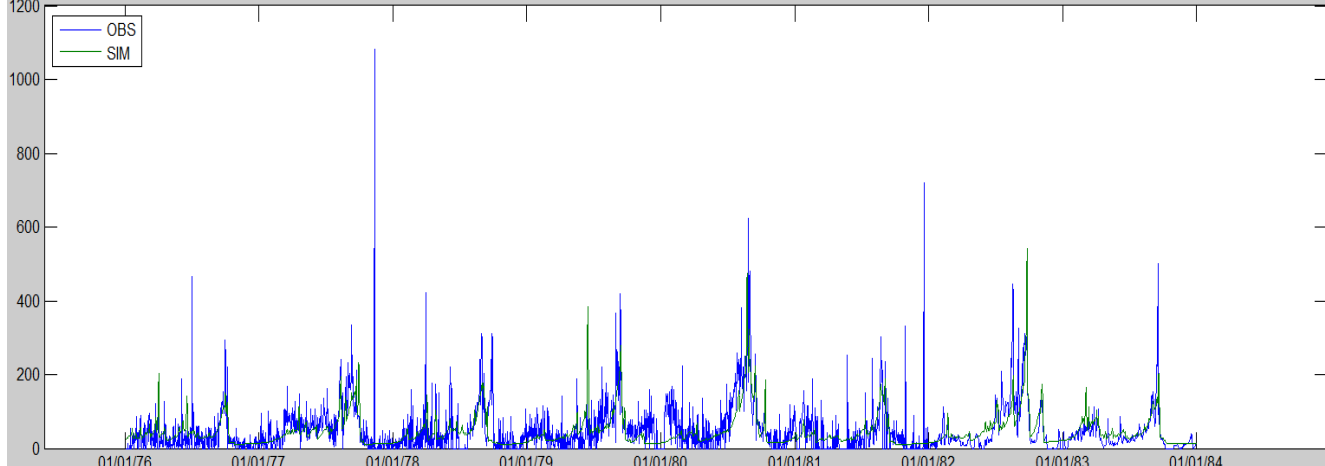


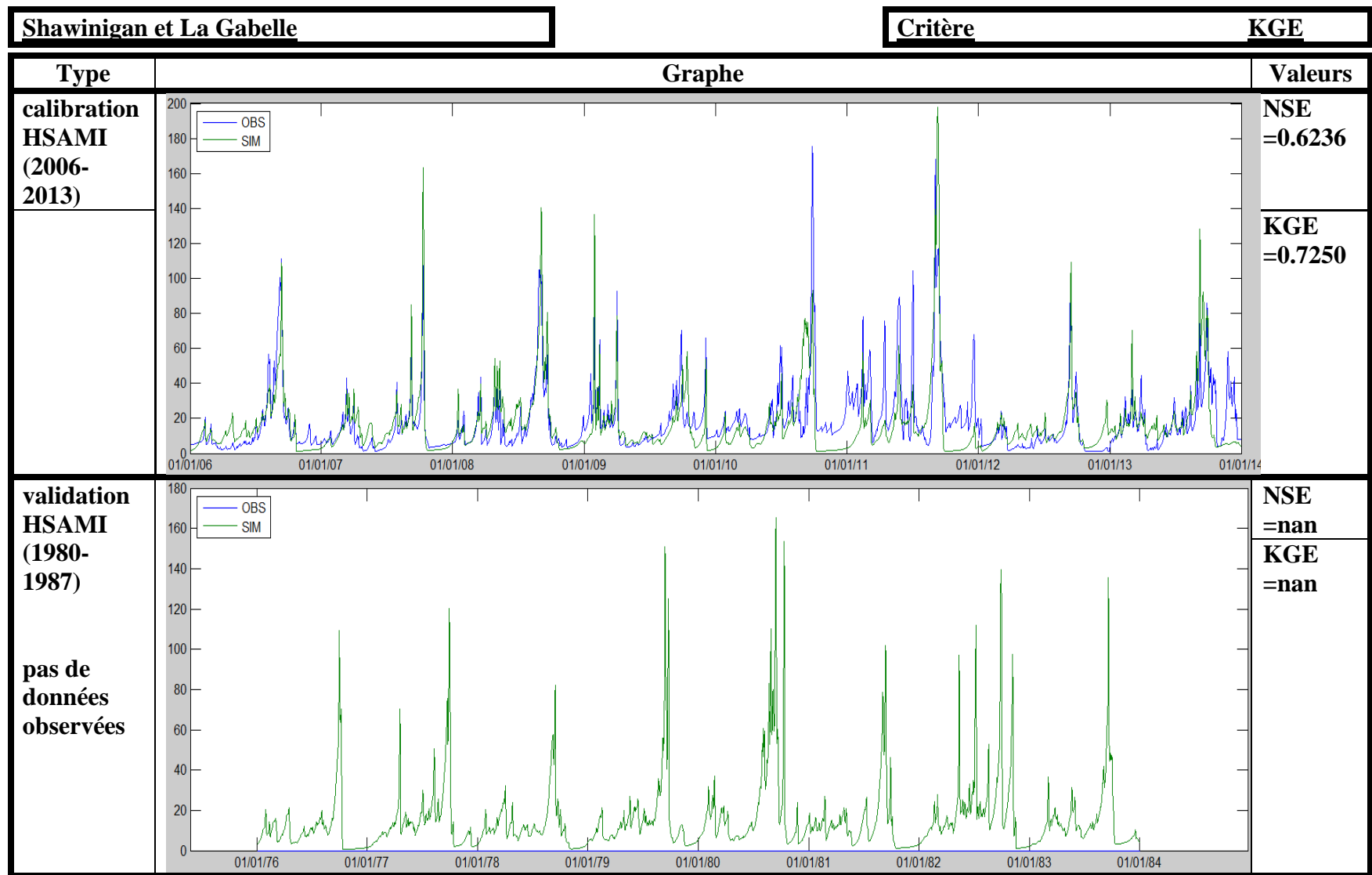


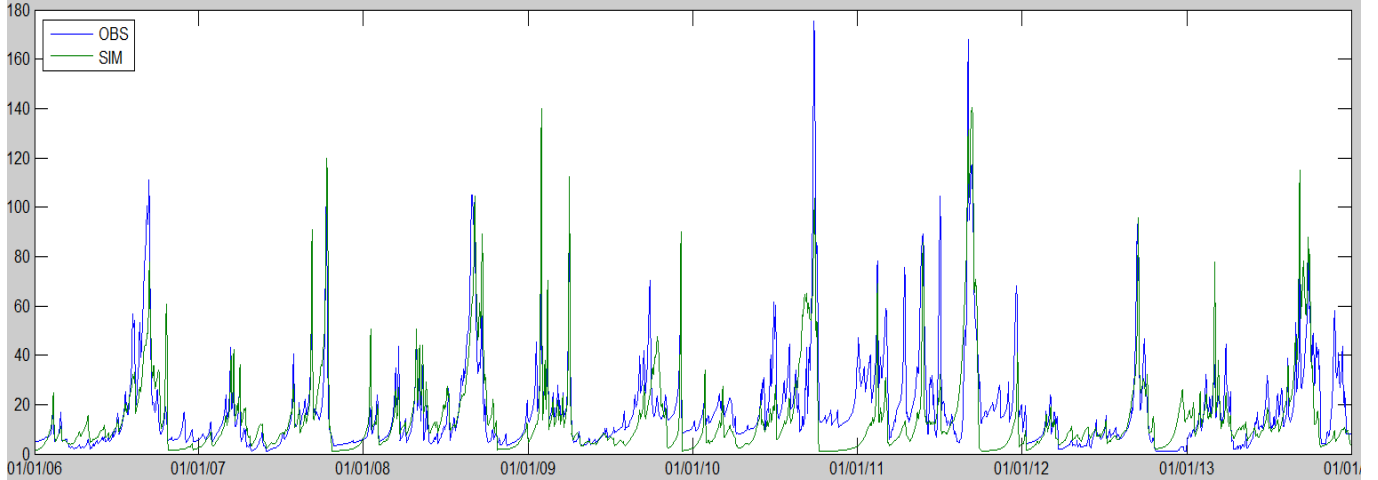
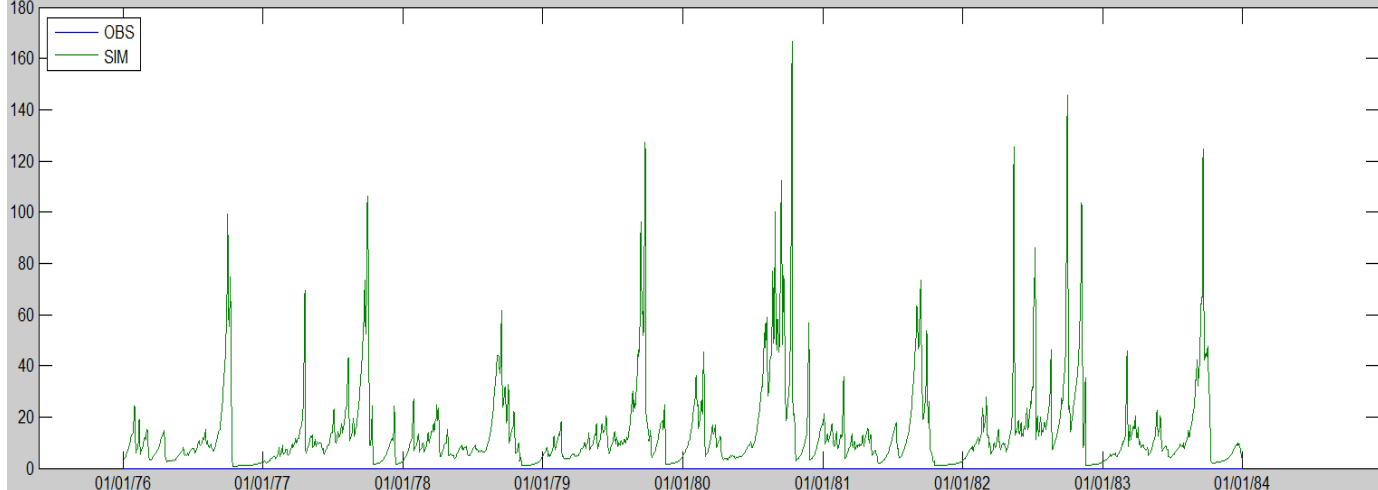


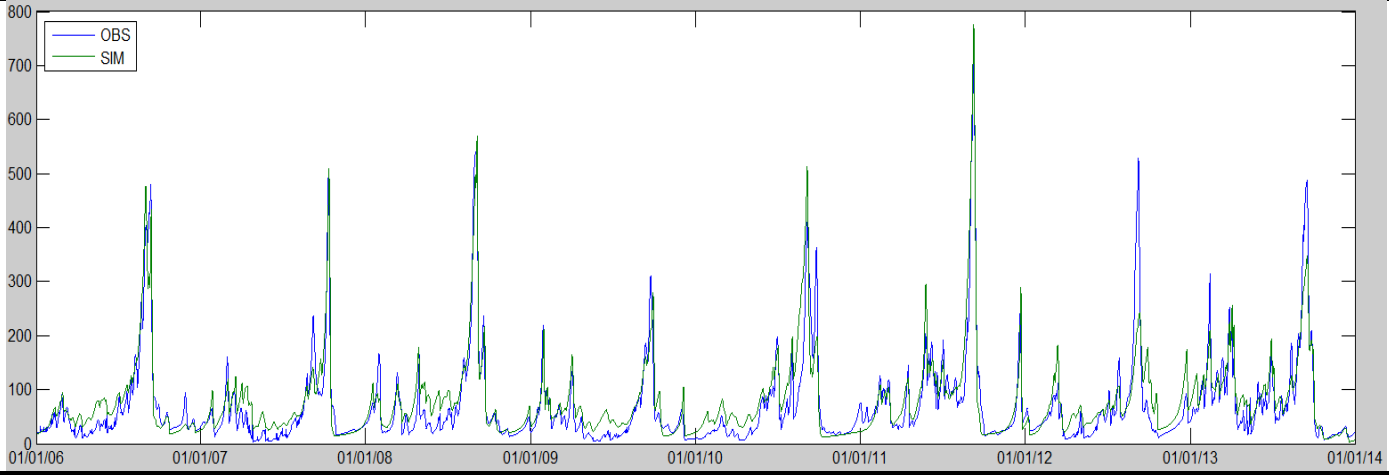
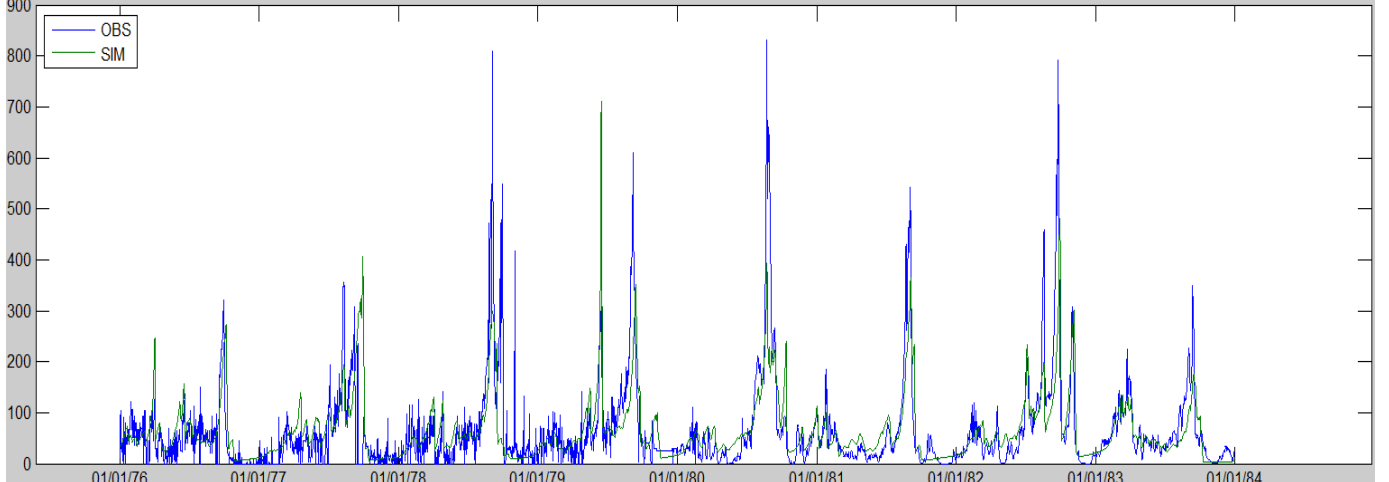
La Tuque		Critère	NSE
Type	Graphe	Valeurs	
calibration HSAMI (2006-2013)		NSE = 0.8788	
		KGE = 0.8468	
validation HSAMI (1980-1987)		NSE = 0.7937	
		KGE = 0.4930	

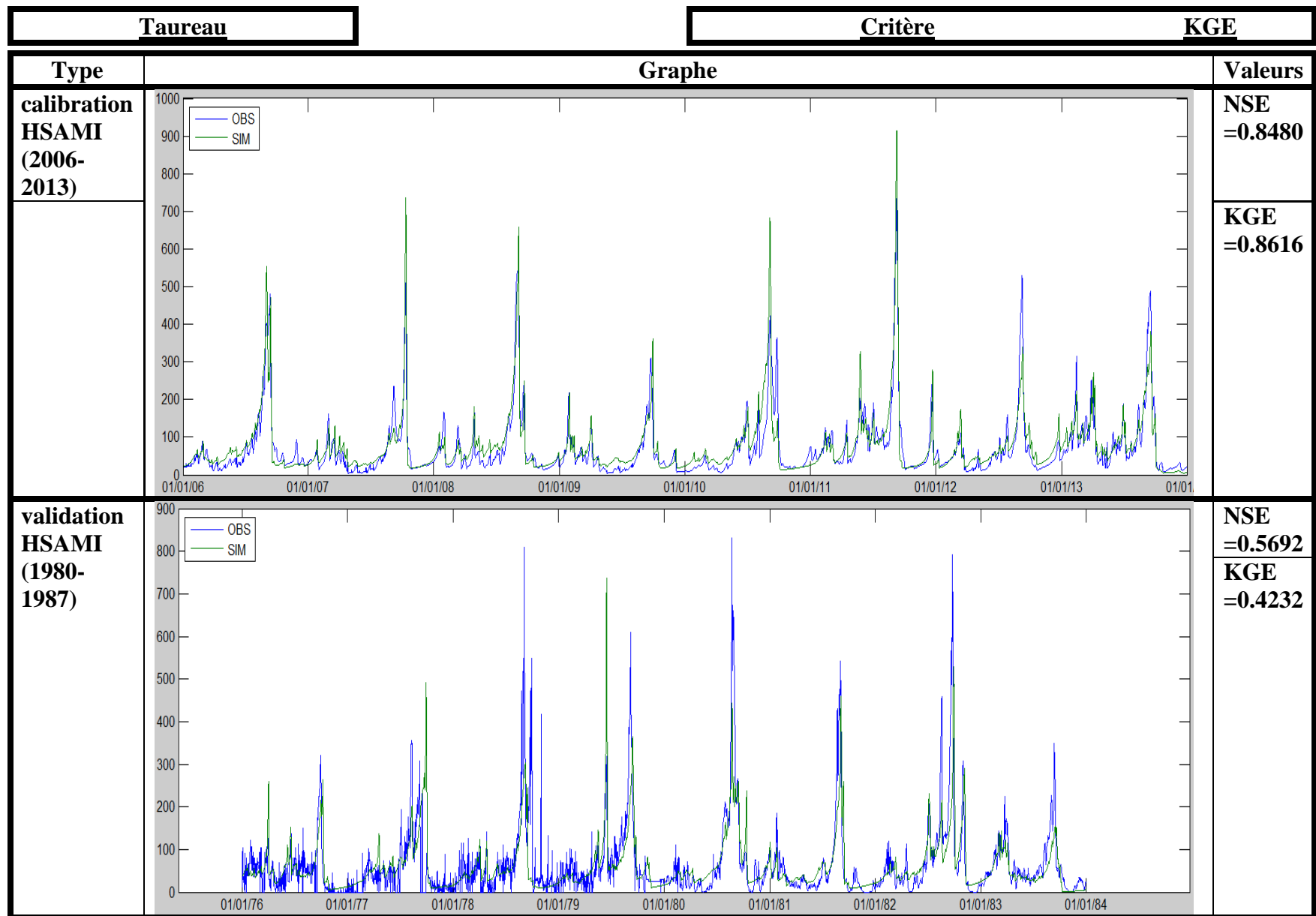
Manouane A-B-C		Critère	NSE
Type	Graphe	Valeurs	
calibration HSAMI (2006-2013)		NSE =0.8631	
		KGE =0.7821	
validation HSAMI (1980-1987)		NSE =0.2822	
		KGE =0.3118	

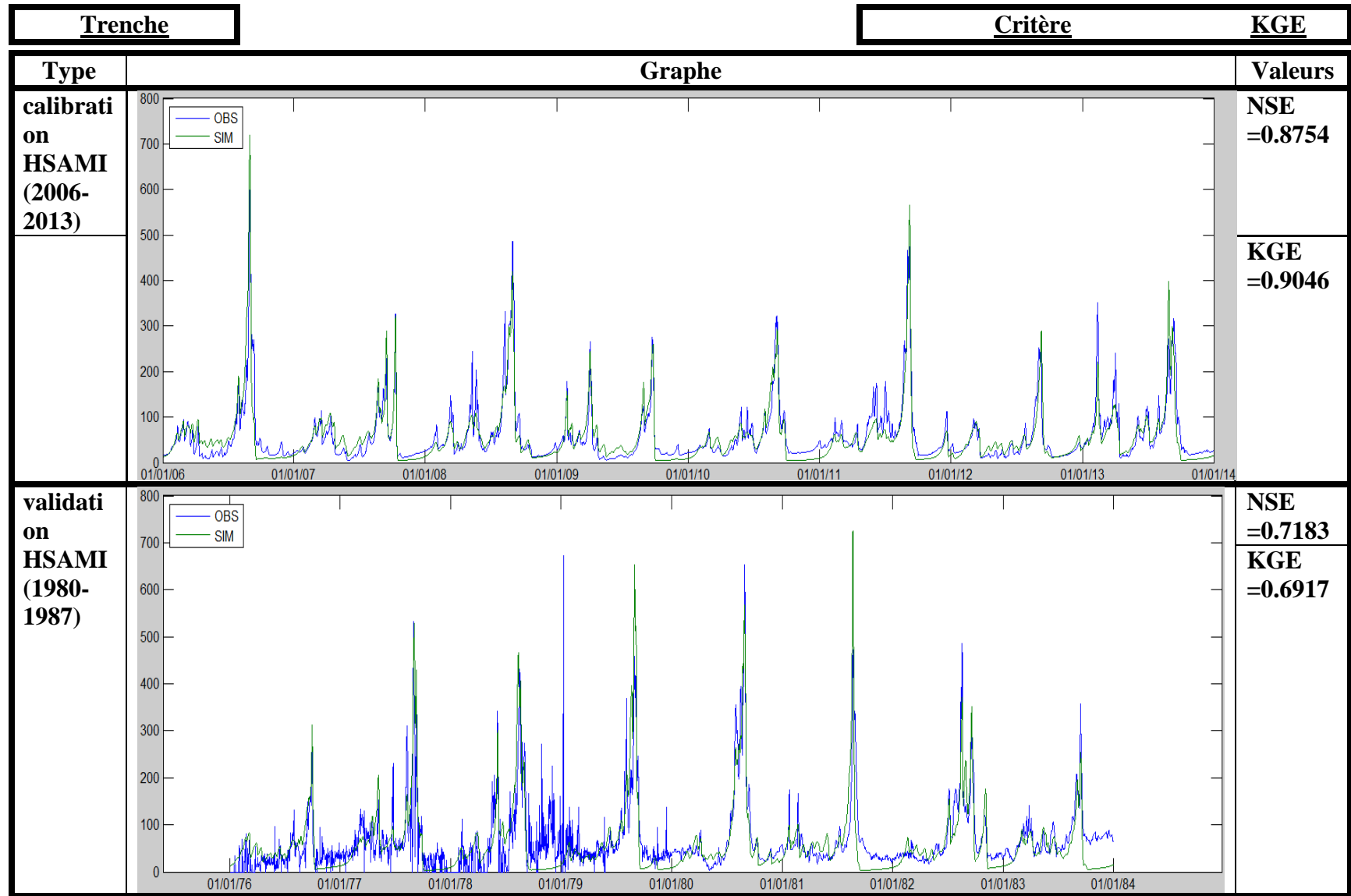
Manouane A-B-C		Critère	KGE
Type	Graphe	Valeurs	
calibration HSAMI (2006-2013)		NSE =0.8250	
		KGE =0.8592	
validation HSAMI (1980-1987)		NSE =0.2931	KGE =0.3448

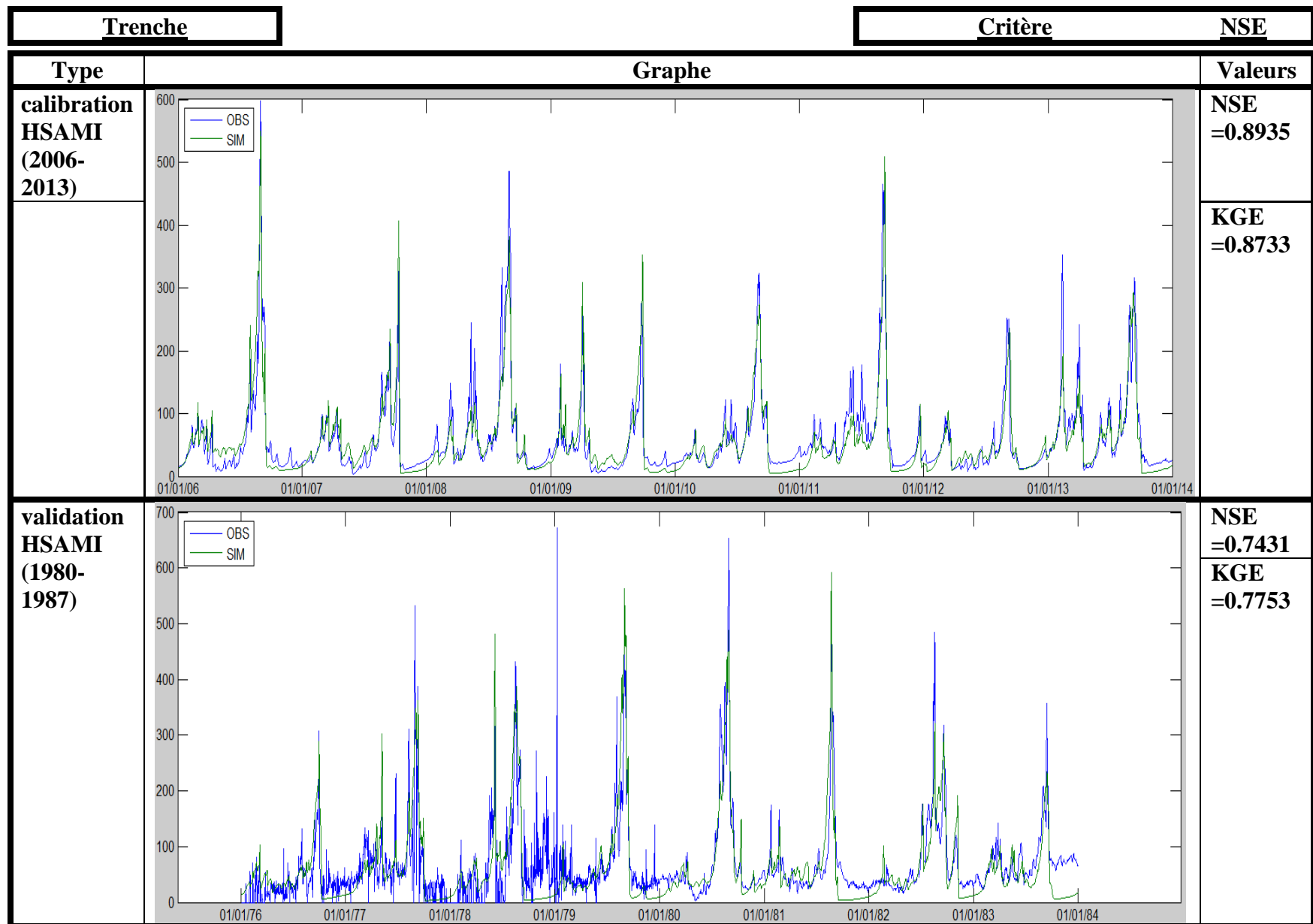


Shawinigan et La Gabelle		Critère	NSE
Type	Graphe	Valeurs	
calibration HSAMI (2006- 2013)		NSE =0.6877	
		KGE =0.7047	
validation HSAMI (1980- 1987) pas de données observées		NSE =nan	KGE =nan

Taureau		Critère	NSE
Type	Graphe	Valeurs	
calibration HSAMI (2006- 2013)		NSE =0.8920	
		KGE =0.7876	
validation HSAMI (1980- 1987)		NSE =0.5739	
		KGE =0.4145	







ANNEXE J - RESULTAT DE L'APPLICATION DE LA METHODE AHP

METHODE AHP

Poids des critères

Aternatives

alt. I = Hydrotel

alt. II = Hsami

alt. III = Hsami-Hydrotel

Nombre de critère N= 5 IA= Indice aléatoire

Cohérence des jugements

Saaty a défini, par expérimentation, un ratio de cohérence comme le rapport de l'indice de cohérence calculé sur la matrice correspondant aux jugements du décideur et de l'indice aléatoire (IA) d'une matrice de même dimension

N=nombre de critères	2	3	4	5	6
IA	0	0,58	0,9	1,12	1,24

N=nombre de critères	7	8	9	10	11
IA	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

Combinaisons binaires des valeurs aij déterminées à l'aide de l'échelle Verbale suivante :

Échelle numérique	Échelle verbale
1,0	Importance égale des deux éléments
3,0	Un élément est un peu plus important que l'autre
5,0	Un élément est plus important que l'autre
7,0	Un élément est beaucoup plus important que l'autre
9,0	Un élément est absolument plus important que l'autre
2,0; 4,0; 6,0; 8,0	Valeurs intermédiaires entre deux jugements, utilisés pour affiner le jugement

Comparaisons binaires des critères par rapport à l'objectif global

	Qlt résultats	Qlt mesure	Calibration	Exploitation résult	Temps de calcul	Vecteur de priorité
Qlt résultats	1,00	1,00	3,00	5,00	9,00	0,35
Qlt mesure	1,00	1,00	3,00	6,00	8,00	0,35
Calibration	0,33	0,33	1,00	7,00	7,00	0,20
Exploitation résult	0,20	0,17	0,14	1,00	4,00	0,07
Temps de calcul	0,11	0,13	0,14	0,25	1,00	0,03
Total	2,64	2,63	7,29	19,25	29,00	1,00

	Qlt résultats	Qlt mesure	Calibration	Exploitation résult	Temps de calcul
	0,35	0,35	0,20	0,07	0,03
Qlt résultats	1,00	1,00	3,00	5,00	9,00
Qlt mesure	1,00	1,00	3,00	6,00	8,00
Calibration	0,33	0,33	1,00	7,00	7,00
Exploitation résult	0,20	0,17	0,14	1,00	4,00
Temps de calcul	0,11	0,13	0,14	0,25	1,00

	Qlt résultats	Qlt mesure	Calibration	exploitation résu	Temps de calcul	Total ligne/priorité
Qlt résultats	0,35	0,35	0,60	0,35	0,28	5,54
Qlt mesure	0,35	0,35	0,60	0,42	0,25	5,59
Calibration	0,12	0,12	0,20	0,49	0,22	5,73
Exploitation résult	0,07	0,06	0,03	0,07	0,13	5,05
Temps de calcul	0,04	0,04	0,03	0,02	0,03	5,10
Total						27,00

$$\begin{aligned}\lambda_{\max} &= 5,40 \\ \text{I.C.} &= 0,10 \\ \text{R.C.} &= 0,09 \quad \text{RC étant } < 0.10, \text{ la matrice est cohérente}\end{aligned}$$

Nombre d'alternatives $N = 3$

Alternatives par rapport à la qualité des résultats

	alt.I	alt.II	alt.III	Vecteur de priorité
alt.I	1,00	3,00	2,00	0,54
alt.II	0,33	1,00	0,50	0,16
alt.III	0,50	2,00	1,00	0,30
Total	1,83	6,00	3,50	1,00

	alt.I	alt.II	alt.III
	0,54	0,16	0,30
alt.I	1,00	3,00	2,00
alt.II	0,33	1,00	0,50
alt.III	0,50	2,00	1,00

	alt.I	alt.II	alt.III	Total ligne/priorité
alt.I	0,54	0,49	0,59	3,01
alt.II	0,18	0,16	0,15	3,00
alt.II	0,27	0,33	0,30	3,01
Total				9,03

$$\begin{aligned}\lambda_{\max} &= 3,01 \\ \text{I.C.} &= 0,00 \\ \text{R.C.} &= 0,01 \quad \text{RC étant } < 0.10, \text{ la matrice est cohérente}\end{aligned}$$

Alternatives par rapport à la qualité de la mesure

	alt.I	alt.II	alt.III	Vecteur de priorité
alt.I	1,00	4,00	3,00	0,62
alt.II	0,25	1,00	0,50	0,14
alt.III	0,33	2,00	1,00	0,24
Total	1,58	7,00	4,50	1,00

	alt.I	alt.I	alt.III
	0,62	0,14	0,24
alt.I	1,00	4,00	3,00
alt.II	0,25	1,00	0,50
alt.III	0,33	2,00	1,00

	alt.I	alt.II	alt.III	Total ligne/priorité
alt.I	0,62	0,55	0,72	3,03
alt.II	0,16	0,14	0,12	3,01
alt.II	0,21	0,27	0,24	3,01
Total				9,06

$$\lambda_{\max} = 3,02$$

$$\text{I.C.} = 0,01$$

$$\text{R.C.} = 0,02$$

RC étant < 0.10, la matrice est cohérente

Alternatives par rapport à la calibration

	alt.I	alt.II	alt.III	Vecteur de priorité
alt.I	1,00	0,33	0,50	0,16
alt.II	3,00	1,00	2,00	0,54
alt.III	2,00	0,50	1,00	0,30
Total	6,00	1,83	3,50	1,00

	alt.I	alt.II	alt.III
	0,16	0,54	0,30
alt.I	1,00	0,33	0,50
alt.II	3,00	1,00	2,00
alt.III	2,00	0,50	1,00

	alt.I	alt.II	alt.III		Total ligne/priorité
alt.I	0,16	0,18	0,15		3,00
alt.II	0,49	0,54	0,59		3,01
alt.III	0,33	0,27	0,30		3,01
Total					9,03

$$\lambda_{\max} = 3,01$$

$$\text{I.C.} = 0,00$$

$$\text{R.C.} = 0,01$$

RC étant < 0.10, la matrice est cohérente

Alternatives par rapport à l'exploitation des résultats

	alt.I	alt.II	alt.III		Vecteur de priorité
alt.I	1,00	3,00	2,00		0,54
alt.II	0,33	1,00	0,50		0,16
alt.III	0,50	2,00	1,00		0,30
Total	1,83	6,00	3,50		1,00

	alt.I	alt.II	alt.III	
	0,54	0,16	0,30	
alt.I	1,00	3,00	2,00	
alt.II	0,33	1,00	0,50	
alt.III	0,50	2,00	1,00	

	alt.I	alt.II	alt.III		Total ligne/priorité
alt.I	0,54	0,49	0,59		3,01
alt.II	0,18	0,16	0,15		3,00
alt.III	0,27	0,33	0,30		3,01
Total					9,03

$$\lambda_{\max} = 3,01$$

$$\text{I.C.} = 0,00$$

$$\text{R.C.} = 0,01$$

RC étant < 0.10, la matrice est cohérente

Alternatives par rapport au temps de calcul

	alt.I	alt.II	alt.III	alt.IV	Vecteur de priorité
alt.I	1,00	5,00	3,00		0,63
alt.II	0,20	1,00	0,33		0,11
alt.III	0,33	3,00	1,00		0,26
Total	1,53	9,00	4,33		1,00

	alt.I	alt.II	alt.III	
	0,63	0,11	0,26	
alt.I	1,00	5,00	3,00	
alt.II	0,20	1,00	0,33	
alt.III	0,33	3,00	1,00	

	alt.I	alt.II	alt.III		Total ligne/priorité
alt.I	0,63	0,53	0,78		3,07
alt.II	0,13	0,11	0,09		3,01
alt.III	0,21	0,32	0,26		3,03
Total					9,12

$$\lambda_{\max} = 3,04$$

$$\text{I.C.} = 0,02$$

$$\text{R.C.} = 0,02$$

RC étant < 0.10, la matrice est cohérente

EVALUATION GLOBALE

CRITERES

Qlt résultats	Qlt mesure	Calibration	Exploitation résultat	Temps de calcul	Poids des alt.
0,35	0,35	0,20	0,07	0,03	

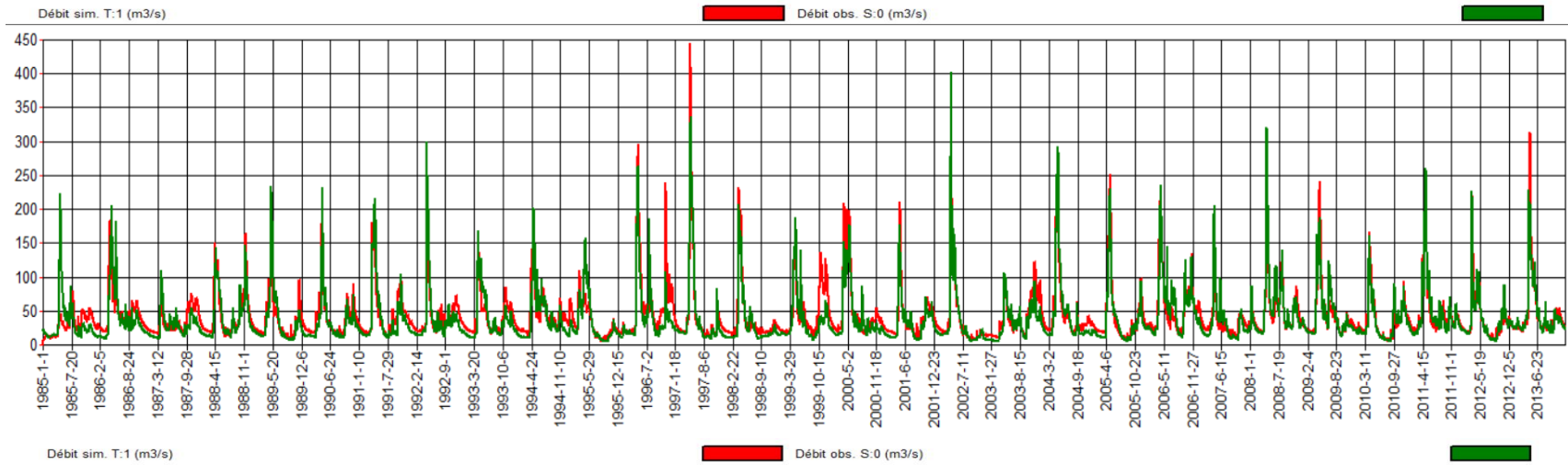
OPTIONS

alt.I	0,54	0,62	0,16	0,54	0,63	0,50
alt.II	0,16	0,14	0,54	0,16	0,11	0,23
alt.III	0,30	0,24	0,30	0,30	0,26	0,28
Total	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Le choix porte sur l'alternative qui a le plus grand poids. Dans notre cas c'est le modèle hydrotel

ANNEXE K - RESULTAT DES SIMULATIONS AVEC LE MODLE HYDROTEL

BV Vermillon



BV Beaumont

